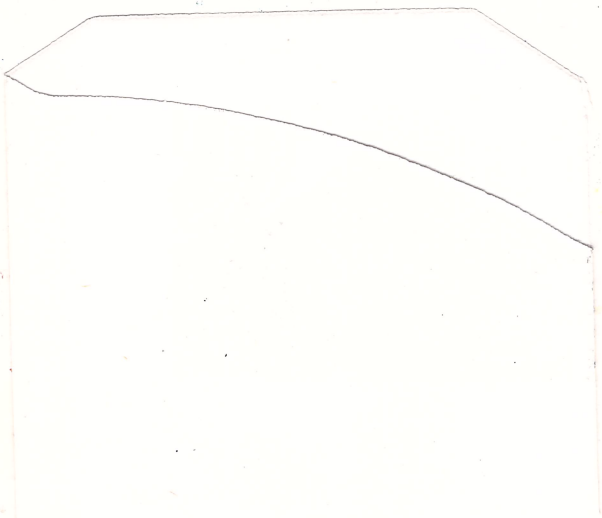
621.395
Т18

М. Д. ТАНГ

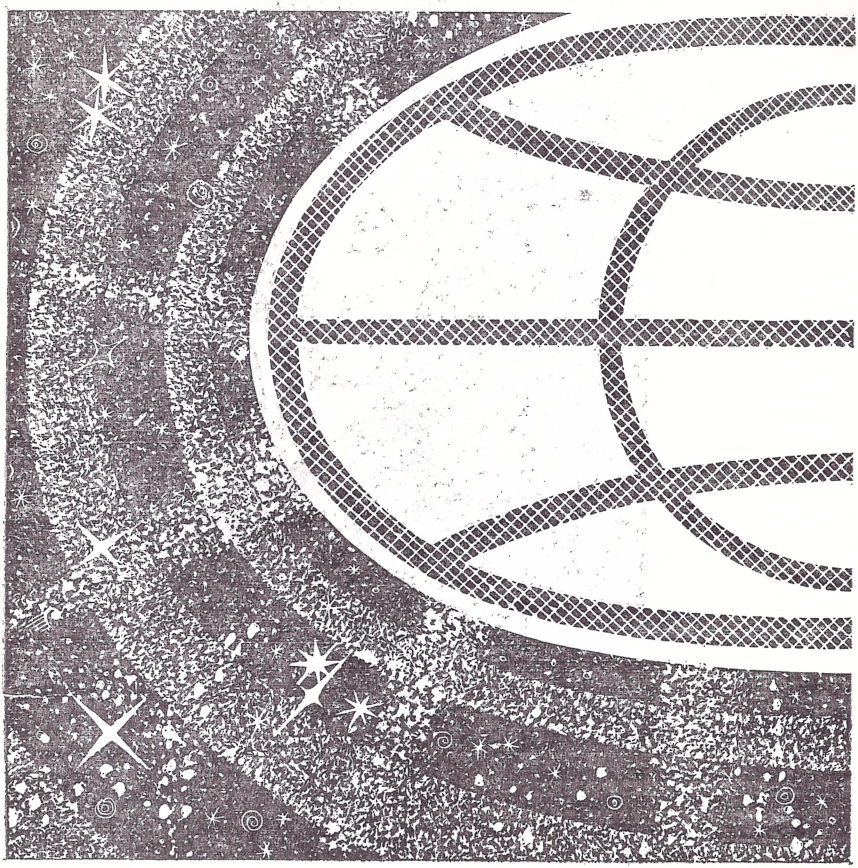
МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. ИСПЫТАНИЯ БЕЛЫМ ШУМОМ

ИЗДАТЕЛЬСТВО „СВЯЗЬ"

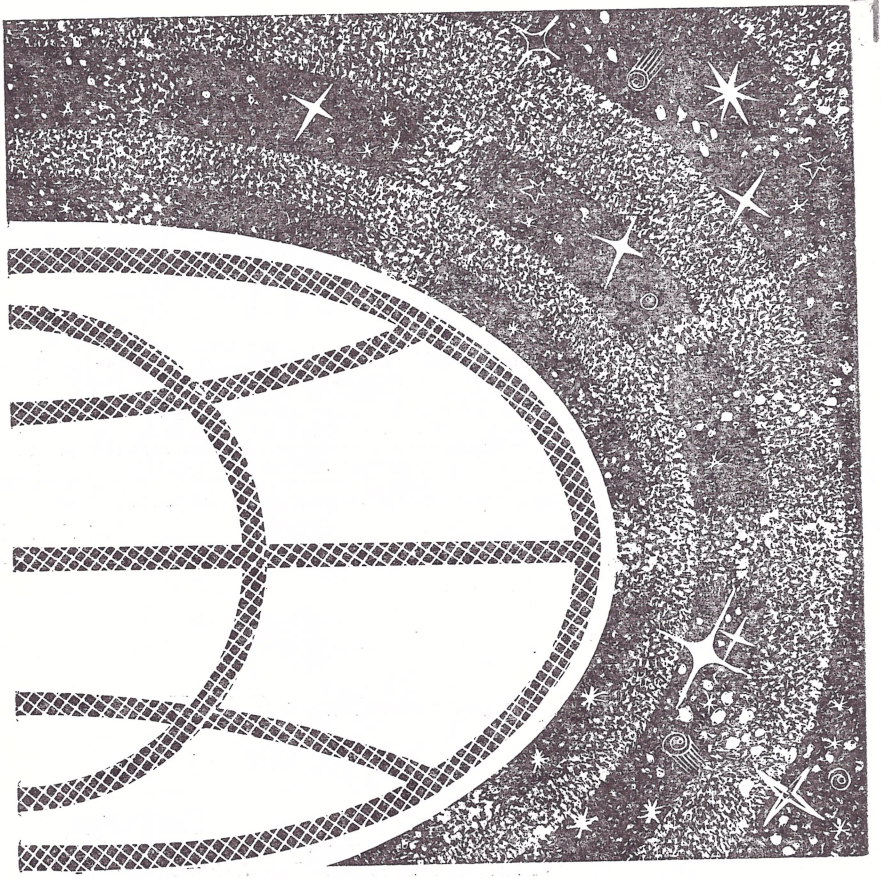


M.J.TANT

MULTICHANNEL COMMUNICATION SYSTEMS AND WHITE NOISE TESTING



621.395
Т18



М. Д. ТАНТ

МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. ИСПЫТАНИЯ БЕЛЫМ ШУМОМ

073663

621.395.44

ПОД РЕДАКЦИЕЙ В. С. РОМБРО

МОСКВА «СВЯЗЬ» 1978

Гуманитарная библиотека
Киевский
авиационный завод

-2013

ПЕРЕВІРЕНО

32.883
Т96
УДК 621.395.44:621.391.883.2:621.317.757

Тант М. Д.

Т96 Многоканальные системы. Испытания белым шумом: Пер. с англ./Под ред. В. С. Ромбро.— М.: Связь, 1978.— 136 с., ил.

65 к.

Дается краткая характеристика многоканальных систем с частотным разделением каналов, приводятся терминология и единицы измерения, используемые в технике многоканальной связи. Описываются основы метода шумовой загрузки и измерения трактов этим методом. Даются обзоры шумовых параметров телефонных цепей и рекомендаций по шумовой загрузке, рассказывается о факторах, определяющих точность измерений и помехозащищенность. Описываются измерительные комплекты. Книга снабжена комментариями, необходимыми для советского издания.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, занятых разработкой, настройкой и обслуживанием многоканальных систем передачи.

$\frac{30602—135}{045(01)—78}$ 51—78 2402040000 ББК 32.883
6Ф1

Перевод с английского А. Ю. Цыма

Перевод осуществлен с разрешения фирмы
«Marconi Instruments Limited»
и автора М. Д. Танта

© Marconi Instruments Limited, 1974
© Предисловие, комментарии, сноски. Издательство «Связь», 1978 г.

Предисловие к русскому изданию

Автор книги — Микаэл Д. Тант — начал работать в фирме «Marconi Instruments Limited» в 1963 г. после окончания высшей школы науки и техники, которую закончил с отличием по специальности электротехника. Он занимал различные должности, в том числе руководил отделом образования и подготовки кадров фирмы, занимался средствами обработки данных. Позже на него была возложена ответственность за распространение на мировом рынке измерительной аппаратуры для систем передачи с частотным разделением сигналов, например для испытаний трактов и каналов связи при их загрузке белым шумом. М. Тант является членом Организации электрорадиоинженеров, а также различных комиссий по стандартизации и измерительной технике.

Предлагаемая читателю книга является, пожалуй, первым достаточно полным изданием по вопросам измерений с загрузкой белым шумом. Перевод книги осуществлен полностью, без сокращений. Переводчик и редактор стремились сохранить форму и стиль изложения материала, лишь в необходимом случае сопровождая его комментариями, обращающими внимание советских читателей на отличия в построении систем и выполнении измерений, имеющиеся в нашей стране. При переводе и редактировании возникали терминологические трудности. Они также пояснены при изложении.

Следует отметить, что автор не приводит сведений об аппаратуре для измерений с загрузкой белым шумом, выпускаемой другими фирмами, например «Сименс» и «Вандель и Голтерман», также уделяющими большое внимание таким измерениям. Книга дополнена сведениями о Рекомендациях МККТТ, принятых после ее выхода в свет (см. гл. 11), и краткой информацией по практическому использованию результатов измерений линейных трактов с загрузкой белым шумом.

Главная цель издания книги состоит в том, чтобы в сжатом и доступном для широкого круга инженерно-технических работников, занимающихся настройкой и эксплуатацией ВЧ систем передачи, виде осветить основные вопросы, связанные с оценкой помехозащищенности передаваемых сигналов при загрузке измеряемых трактов сигналом белого шума.

Книга будет в первую очередь полезна специалистам, занимающимся эксплуатацией и настройкой ВЧ систем передачи, а также преподавателям и студентам институтов и техникумов связи.

Замечания по содержанию и оформлению книги просьба направлять в издательство «Связь» по адресу: 101000 Москва, Чистопрудный бульвар, 2.

Редактор канд. тех. наук В. С. Ромбро

Введение

Передача телефонных сигналов путем объединения их в многоканальный сигнал при использовании частотного уплотнения впервые была осуществлена в коммерческих целях в 1918 г. В то время существовало менее 20 млн. телефонов. Теперь их более 300 млн.

Быстрое расширение, в частности, международного телефонного обмена, потребовало разработки рекомендаций для обеспечения приемлемых уровней качества передачи информации и совместимости систем. Поскольку качество передачи принципиально зависит от нелинейных помех, вносимых системой в полосу частот определенного телефонного канала, то требования по допустимой величине помех являются существенной частью этих рекомендаций. В 1955 г. впервые был продемонстрирован метод оценки уровня мощности помех в системе при загрузке тракта белым шумом, который являлся имитатором телефонной загрузки. С тех пор измерения с загрузкой трактов белым шумом были приняты как обязательная составная часть исследований, разработки, производства, настройки и эксплуатационного обслуживания многоканальных систем с частотным уплотнением.

Эта книга написана как дополнение к обычному курсу по многоканальной связи. В ней приведена история развития частотного уплотнения и дано краткое описание разнообразной существующей аппаратуры передачи как кабельных, так и радиосистем. Дается пояснение по поводу несколько озадачивающего количества различных измерительных единиц, встречающихся в современной телефонии. Для инженера, работающего в области телефонии, во второй половине книги приводится обзор существующих требований к помехозащищенности многоканальных систем, а также первоначальные и ныне действующие рекомендации по испытаниям белым шумом. Рассматривается довольно значительное количество различных факторов, влияющих на точность измерения помехозащищенности. Приведены диаграммы и таблицы, позволяющие инженеру, занимающемуся измерениями при загрузке трактов белым шумом, определить поправочные коэффициенты, если требуется повысить точность измерений.

Глава 1 Многоканальные телефонные системы с частотным уплотнением[1]

1.1. Краткая история многоканальной передачи телефонных сигналов

Более ста лет назад телефонов не существовало. Сегодня телефон является неотъемлемой потребностью большинства людей во всем мире. Со времени замечательного изобретения Александра Грэхема Белла в 1876 г. телефон стал существенным фактором экономического и социального прогресса. К 1920 г. во всем мире было около 20 млн. телефонов, а в 1972 г. общее их количество превысило 300 млн. За последние 10 лет количество телефонов удвоилось, и можно ожидать, что в дальнейшем число телефонных аппаратов будет возрастать более чем на 6% в год; такой темп роста числа телефонов превышался ежегодно со времени второй мировой войны. Столь высокого уровня развития никогда нельзя было бы достичь, не имея возможности организовать по проводу, кабелю или радиостволу одновременно более одного телефонного канала. Такая многоканальная передача обеспечивается применением процесса, названного уплотнением.

Однако первая практическая телефонная цепь была однопроводной с телефонными аппаратами, включенными на ее концах. Это весьма примитивное устройство в 1878 г. было заменено первым коммутатором, который позволил осуществить соединение нескольких телефонных аппаратов через коммутационное поле. Вскоре путем организации линий связи между местными коммутаторами были созданы региональные телефонные сети. Позже главные коммутационные станции каждого района были соединены между собой магистралями дальней связи. Эти станции получили название междугородных телефонных станций. Первоначально используемые цепи с заземленным проводом сильно подвержены внешним влияниям, поэтому уже к 1900 г. их в основном заменили двухпроводными цепями, в которых один из проводов служит для передачи в обратном направлении. Объединение пар проводов в кабели позволило «спрятать» в землю некоторые из значительного количества линий. Однако и это не решило проблему, заключающуюся в необходимости увеличения количества линейного оборудования для удовлетворения растущих потребностей в связях. Необходим был способ, позволяющий увеличить количест-

[1] В СССР часто применяется термин «ВЧ система передачи» (здесь и далее цифрами отмечены примечания отв. редактора).

во каналов без прокладки дополнительных тысяч километров проводов.

В конце XIX в. были проведены эксперименты по созданию систем уплотнения. Однако их успешное развитие задержалось до возникновения электроники в начале 1900 г. Первая коммерческая система уплотнения, по-видимому, была создана в США, где в 1918 г. между Балтиморой и Питсбургом начала работать четырехканальная система с частотным разделением сигналов (способ уплотнения см. в гл. 2). До второй мировой войны большинство разработок было направлено на увеличение эффективности систем уплотнения воздушных линий и многопарных кабелей, поскольку по этим двум средам передачи были организованы почти все телефонные цепи. Ограниченная полоса частот таких линий не позволяла организовать более 24 каналов.

Вскоре после второй мировой войны передачу информации начали осуществлять по более широкополосным направляющим системам (по коаксиальным кабелям и УКВ радиорелейным линиям [РРЛ]), позволившим организовать несколько сот телефонных каналов. Например, в 1948 г. между городами, находящимися на Атлантическом и Тихоокеанском побережьях США, фирмой «Bell System» (Белл) была введена в эксплуатацию кабельная система L1, которая обеспечивала связь по 600 каналам. В 1950 г. начала работать УКВ радиорелейная система TD-2, позволившая организовать связь также по 600 каналам в одном радиостволе. В настоящее время широко применяются системы, позволяющие организовать до 2700 каналов по коаксиальному кабелю, вводятся в эксплуатацию кабельные системы емкостью 10 800 каналов (60 мГц) и разрабатываются системы емкостью свыше 20 000 каналов (150 мГц). Широко используются УКВ радиосистемы, позволяющие организовать до 1860 каналов как по наземным радиорелейным линиям, так и по спутниковым линиям. Кроме того, в эксплуатации находится некоторое количество систем емкостью 2700 каналов.

В СССР последовательно были созданы 12-, 24- и 60-канальные системы уплотнения симметричных кабелей связи; 1920-, 300- и 3600-канальные системы уплотнения коаксиальных цепей; 60-, 120-, 600- и 1920-канальные стволы радиорелейных систем связи [2].

1.2. Системы малой емкости

В настоящее время на магистральных линиях широкополосные системы передачи по коаксиальным кабелям и УКВ радиорелейным линиям почти полностью вытеснили системы уплотнения малой емкости, работающие по симметричным кабелям и воздушным линиям. Однако в районах с низкой плотностью населения и

[2] Интересующимся историей развития средств связи в СССР советуем прочесть книги: М. Р. Резников «50 лет советской связи». М., «Связь», 1967 и «80 лет радио», под ред. А. Д. Фортушенко. М., «Связь», 1975.

для связей местных коммутационных станций еще довольно широко применяются системы уплотнения малой емкости.

Если число абонентов превышает число имеющихся воздушных линий связи, а применение групповых абонентских линий нежелательно, иногда может оказаться более экономичным применить систему уплотнения, а не организовывать дополнительные линии. Такие системы, называемые станционными или абонентскими, позволяют создавать от 1 до 12 дополнительных двусторонних каналов. Промежуточные усилители устанавливаются обычно с интервалами от 1 до 3 миль [3].

До применения систем уплотнения большое количество цепей организовывалось по многопарным кабелям. Эти кабели содержали до 96 четверок, заключенных в одну оболочку. Сейчас по каждой паре такого кабеля (в зависимости от их качества) можно организовывать до 120 каналов при установке усилителей на расстоянии от 3 до 6 миль друг от друга. Обратное направление передачи организуется обычно по отдельному кабелю. Такие системы связи часто применяются на линиях между местными коммутационными станциями или местными и междугородными коммутационными станциями.

К рассматриваемой классификации следует отнести широко применяемые в СССР на зоновой сети (и на ряде участков магистральной сети) системы уплотнения симметричных кабелей К-60П, К-60П-4 и другие 60-канальные системы, системы уплотнения многопарных телефонных кабелей КРР 30/60 и «Кама», а также систему уплотнения однокоаксиального кабеля ВКПАП К-120. Системами малой емкости является также многочисленное семейство систем уплотнения воздушных цепей В-3-3, В-12 и др.

1.3. Коаксиальные кабельные системы

Большое количество систем малой емкости организовано по существующим воздушным или многопарным кабельным линиям. Верхние граничные частоты таких систем составляют соответственно 150 и 600 кГц из-за сложности выравнивания частотных характеристик и слишком малого расстояния между промежуточными усилителями [4].

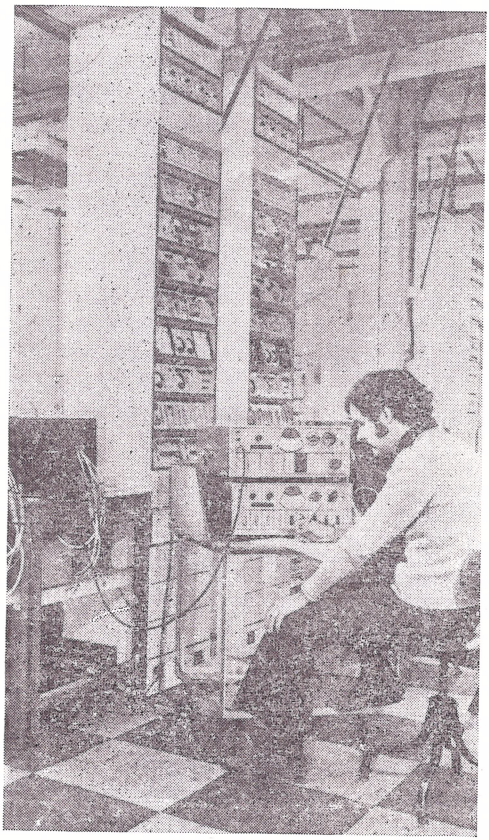
С таким объяснением трудно согласиться. Современное развитие техники связи и применение транзисторов делают несущественными трудности выравнивания неравномерностей АЧХ и снимают ограничения в части количества НУП, т. е. длины усилительных участков. Однако указанное автором ограничение частотных диапазонов на сегодня справедливо из-за трудностей в обеспечении требуемой защищенности сигналов от помех, переходящих с параллельных цепей.

Для работы систем большей емкости потребовались более широкополосные линии, чем для систем малой емкости. Первые системы уплотнения коаксиальных кабелей имели полосу частот ли-

[3] 1 миля = 1609,344 м.

[4] К системам малой емкости следует отнести также и упомянутую выше систему К-120, разработанную для уплотнения коаксиального кабеля.

нейного тракта до 1,3 МГц и обеспечивали связь по 300 каналам. Затем появились системы емкостью 600 каналов (см. в § 1.1 систему L1). В настоящее время широко применяют системы, работающие в полосе частот до 12 мГц (2700 каналов).



Последние испытания перед установкой оконечных станций и промежуточных усилителей системы со спектром частот линейного тракта до 12 МГц для уплотнения коаксиального кабеля

Коаксиальные цепи иногда прокладываются отдельно, а иногда объединяются в общую защитную оболочку. Например, американская фирма «Белл» завершила разработку межконтинентальной системы L4 с шириной полосы 17,5 мГц (3600 каналов по коаксиальной цепи или «трубке»), причем для этой системы разработан кабель, в котором 20 «трубок» объединены в одной защитной кабельной оболочке[5]. Общая емкость кабеля составила 32 400 каналов в каждом направлении, а две «трубки» оставлены резервными. Система L5 фирмы «Белл» (60 МГц) имеет емкость 9000 каналов по каждой паре, а в общей оболочке кабеля объединены 22 пары. Таким образом, эта система обеспечивает 90 000 дуплексных телефонных каналов плюс резерв. В настоящее время в Европе монтируется система с шириной полосы в 60 МГц (10 800 каналов). Эта система Британского Почтового Ведомства работает по кабелю, содержащему 18 трубок в одной оболочке, что дает возможность получить 86 400 дуплексных телефонных каналов и резерв[6].

Поскольку затухание кабеля на единицу длины растет с частотой и с уменьшением размера кабельной пары, в системах боль-

[5] В СССР имеется система К-3600 с аналогичным числом каналов, разработанная для уплотнения коаксиальных цепей отечественного кабеля КМБ 8/6, имеющего 14 коаксиальных цепей в одной оболочке.

[6] Разработка системы на 10 800 каналов по одной коаксиальной цепи проводится и в нашей стране.

шой емкости усилители располагаются очень близко друг от друга и применяется дорогостоящая аппаратура выравнивания частотных характеристик. Например, при использовании кабеля с парами 2,6×9,5*) мм промежуточные усилители обычно размещаются на расстоянии 1 мили друг от друга в системе с полосой 60 мГц и 3 миль в системе с полосой 12 МГц. Это расстояние увеличивается до 6 миль для систем с полосой 4МГц и до 12 миль для систем с верхней частотой 1,3 МГц. При применении кабеля меньшего диаметра (1,2×4,4 мм) усилители размещаются на более близком расстоянии.

Коаксиальные цепи, весьма близкие к указанным размерам, приняты в качестве стандартных и в нашей стране. Например, упомянутый выше кабель КМБ 8/6 имеет 8 цепей 2,58/9,4 мм и 6 цепей 1,2/4,6 мм. При этом длина усилительного участка в системе К-300 (коаксиальная цепь 1,2/4,6 мм) составляет 6 км, а в системах К-1920, К-3600 и К-10 800 (коаксиальная цепь 2,58/9,4 мм) — соответственно 6, 3 и 1,5 км.

Коаксиальные кабельные системы большой емкости обычно применяются для связи между близко расположенными центрами с высокой плотностью населения. Однако стоимость монтажа таких систем высока из-за незначительного расстояния между промежуточными усилителями и вследствие большой стоимости кабеля и его прокладки. В то же время в районах с трудным для прокладки кабеля грунтом и особенно там, где не требуется большого числа каналов, более часто применяются радиосистемы.

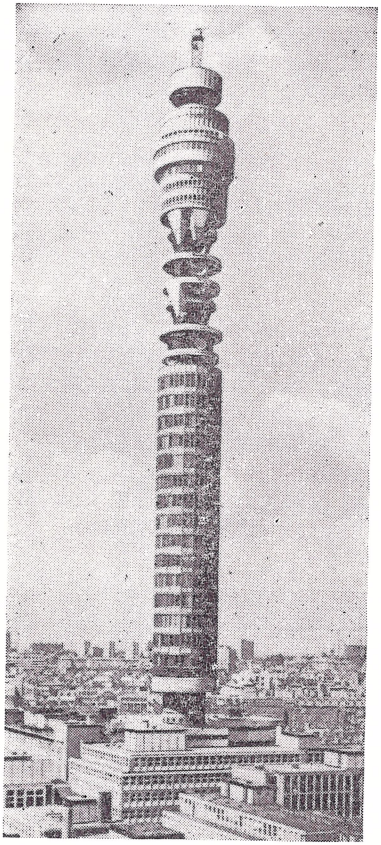
1.4. Радиорелейные системы на УКВ (прямой видимости)

С момента появления УКВ РРЛ в 40-х годах потребность в них постоянно увеличивалась. Благодаря быстрому развитию радиолокационной техники во время второй мировой войны были получены основные предпосылки для создания УКВ радиосистем. В широкополосных коммерческих системах начали применять такие устройства, как клистрон, лампы бегущей волны и антенны с высоким коэффициентом усиления. Системы УКВ РРЛ быстро начали применять в качестве основных телефонных и телевизионных распределительных систем во многих странах. Например, в США фирмой «Белл» разработана система TD-2, позволяющая организовать 600 телефонных каналов или один видеоканал по каждому радиостволу. Она впервые введена в эксплуатацию в сентябре 1950 г. между Нью-Йорком и Чикаго. К 1962 г. была создана национальная сеть, по которой организовано около 90% всех междугородных видеоканалов и 40% телефонных цепей большой протяженности. До недавнего времени телефонные компании были наиболее серьезными коммерческими потребителями УКВ

---

* Числа указывают внешний диаметр внутреннего проводника и внутренний диаметр внешнего проводника соответственно.

РРЛ систем для передачи на большие расстояния речи, видеосигналов и цифровой информации. Однако сейчас все больше и больше отраслей промышленности применяют УКВ РРЛ системы для передачи информации по собственным сетям связи. К таким предприятиям относятся железные дороги, нефтяные, газовые и электрические компании, а совсем недавно к ним присоединились и отдельные частные предприятия (в тех случаях, когда позволяют национальные правила).



Здание Post Office (Британского Почтового ведомства) в Лондоне. Видны установленные на высотной части здания антенны УКВ

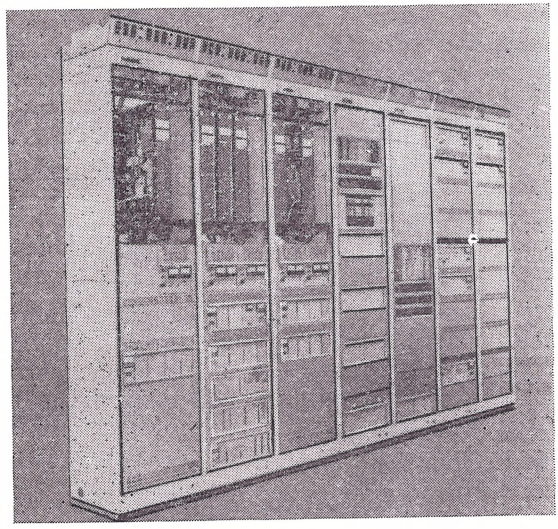
Групповой спектр систем, работающих по РРЛ, в основном обеспечивает передачу сигналов телефонных каналов или видеоканала, или каналов передачи данных. Емкость таких систем достигает 1860 телефонных каналов, а некоторых и 2700 каналов. Наиболее распространены системы емкостью 600, 960, 1260 и 1860 каналов (размещение спектра рассмотрено ниже, в гл. 2). Групповой сигнал модулирует промежуточную частоту (обычно 70 мГц), которая затем преобразуется в частоту передачи. Для существующих радиорелейных линий полосы частот расположены в диапазоне от 2 до 12 ГГц, но наибольшее число связей организовано в полосах 2,4 и 6 ГГц.

Например, отечественные системы имеют следующие диапазоны дециметровых и сантиметровых волн:

Р-6/120, ГГц	1,2—2,0
Р-600, ГГц	3,4—3,9
«Дружба», ГГц	5,67—6,17

Применение параболических или рупорных антенн с высоким коэффициентом усиления позволяет обеспечить расстояние между промежуточными усилительными станциями «прямой видимости» от 20 до 30 миль при мощности передачи около 1 Вт. Если в промежуточных пунктах требуется коммутация телефонных каналов, необходимо осуществлять демодуляцию до группового спектра. В других случаях промежуточные усилительные станции обычно усиливают сигнал в спектре промежуточной частоты, хотя в настоящее время начинают применяться усилители в спектре радиочастот. После усиления сигнала промежуточная частота преобразуется в радиочасто-

ту, отличающуюся от принятой частоты. Так поступают потому, что обычно для направлений приема и передачи применяется одна и та же антенна. Кроме того, одна антенна позволяет передавать или принимать более чем одну радиочастоту. Как правило, одна антенна позволяет передавать от 3 до 6 радиочастот в каждом направлении передачи. В некоторых системах предусмотрена передача в



Комплект радиооборудования системы 116 H_3 емкостью 960 каналов ТЧ

каждом направлении до 12 радиочастот. Радиочастоты размещаются на расстоянии от 7 до 40 МГц друг от друга в зависимости от типа антенны, емкости системы и значения несущей радиочастоты.

Например, упоминавшаяся радиорелейная системы типа TD-2 с промежуточными каналами дает возможность осуществлять передачу в каждом направлении сигналов 6000 телефонных каналов, причем при помощи одной антенны передаются 10 основных радиочастот и 2 радиочастоты, используемые для защиты. Более поздняя (1961 г.) радиорелейная система типа ТН (6 ГГц) позволяет получать больше 11 000 телефонных каналов при емкости каждого радиоканала 1860 телефонных каналов. Система типа TD-3, эксплуатация которой началась в 1968 г., предусматривает такое же размещение промежуточных усилительных станций, те же антенны и фидеры, что и в существующей системе TD-2, и обеспечивает организацию 12 000 телефонных каналов при емкости каждого группового тракта 1200 каналов.

В результате роста потребности в емкости радиорелейных линий нижние радиочастоты (до 6 ГГц) оказываются занятыми, и в настоящее время большее внимание уделяется радиочастотам в области до 12 ГГц. Например, системы фирмы «Белл» типа TL-1 (1963 г.) и TL-2 (1966 г.), рассчитанные для связей на расстояния до 250 миль и имеющие емкость 300 и 600 каналов соот-

ветственно, работают в диапазоне 11 ГГц. Однако возможно, что развитие местных и региональных спутниковых систем связи позволит сократить рост числа промежуточных УКВ станций в некоторых районах (см. § 1.7).

1.5. Системы тропосферного рассеивания (загоризонтные)

Подобно УКВ радиорелейным линиям прямой видимости, системы тропосферного рассеивания стали реализуемыми благодаря интенсивному развитию УКВ техники во время второй мировой войны. Радиолинии на УКВ, описанные в предыдущем параграфе, могут работать только в пределах одного участка прямой видимости или немного больше*, т. е. от 20 до 30 миль. Работа систем тропосферного рассеяния основана на том факте, что тропосфера (т. е. область между поверхностью Земли и стратосферой) рассеивает УКВ сигналы, при этом незначительная часть сигналов отражается к поверхности Земли. Поэтому сочетание передатчиков большой мощности, мощных антенных систем и очень чувствительных приемников позволяет осуществлять удовлетворительную связь за пределами прямой видимости. Первая практическая тропосферная система, предложенная фирмой «Белл» в 1952 г., имела название «Pole vault»[7]. Эта система предназначалась для вооруженных сил США. Линия построена вдоль восточного побережья Канады от Нью-Фаундленда до о. Баффинова Земля. Эксплуатация системы началась в 1955 г., протяженность связей 1600 миль при 9 переприемах. Емкость системы 36 телефонных каналов.

Основным преимуществом тропосферных систем является возможность перекрывать расстояние до 500 миль без промежуточных усилителей. Это особенно важно в тех случаях, когда связь должна быть организована через районы с суровыми геологическими или другими условиями. Кроме того, если прокладка подводного кабеля (см. § 1.6) нецелесообразна, средняя емкость тропосферных систем до 300 каналов делает их особенно пригодными для связи через водные пространства. Например, тропосферные линии были организованы вдоль Алеутских островов к Аляске (1400 миль — 9 пролетов); с севера на юг Японии и далее через Тайвань к Филлипинам; между о. Крит и Кипр (350 миль — 1 пролет).

Военные ведомства быстро обратили внимание на надежность тропосферных систем. Например, система «Dew Line»[8] через Северную Канаду (1958 г.) и соединенная с ней «Dew East»[8] через

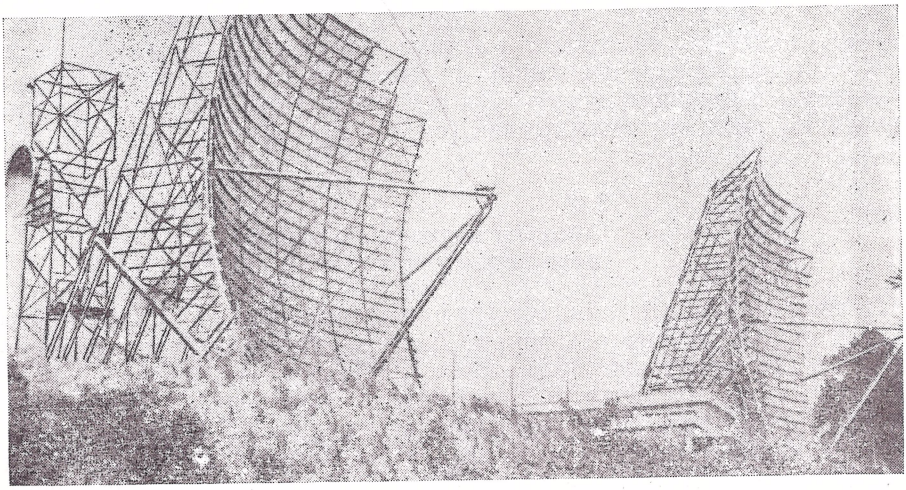
* На самом деле путь распространения УКВ слегка искривлен из-за отражения, вызванного изменением плотности атмосферы с высотой. Следовательно, их дальность действия несколько превышает расстояние, определенное по прямой линии.

[7] Дословно — «Прыжок с шестом».

[8] «Линия Росы» и «Восточная Роса».

Северную Атлантику (1962 г.) образовали цепь дальнего обнаружения от Великобритании к Аляске длиной свыше 5 000 миль. За последнее время было организовано значительное количество как коммерческих, так и военных систем. В 60-х годах наблюдалось постоянное увеличение емкости тропосферных линий более чем на 20% в год, а к концу 60-х годов их протяженность значительно превысила 3 млн. канало-миль.

Из-за больших потерь (обычно от 200 до 250 дБ) этот вид пе-



Сдвоенные 60-футовые антенны тропосферной линии связи Гайяна-Тринидад в Мон-Блю (Тринидад). При длине пролета в 345 миль система имеет емкость 72 канала ТЧ

редачи требует очень высокой мощности сигнала на передающем конце: примерно от 200 Вт для систем малой емкости, работающих на короткие расстояния (до 100 миль), до 10 кВт. Чаще всего мощность передатчика составляет 1 кВт. В исключительных случаях, при длинах пролетов до 500 миль, мощность передатчика может составлять 50 или 100 кВт. Однако обычная длина пролета — 150 миль. Используются параболические антенны с высоким коэффициентом усиления и диаметром от 30 до 120 футов[9]. Передача в большинстве случаев ведется в диапазонах частот 900 МГц и 2 ГГц, хотя иногда пользуются частотами в диапазонах до 8 ГГц.

Природа тропосферного рассеивания делает его чувствительным к значительным федингам (замираниям), поэтому для поддержания удовлетворительного качества связей обычно пользуются разнесенными передатчиками и приемниками. Основными

[9] 1 фут = 30,48 см.

параметрами разнесения являются расстояние, частота и угол наклона антенны. При пространственном разнесении расстояние между приемными антеннами должно составлять, по крайней мере, 100 длин волны, а при частотном разнесении частоты должны отличаться не менее чем на 1%. Во многих системах используется четырехкратное разнесение, причем «разносятся» два различных параметра, например пространство и частота.

Емкость систем может быть очень небольшой, например 6 каналов (система «Thin Line»[10]). Однако в основном применяются системы емкостью до 132 телефонных каналов. В настоящее время существуют системы с максимальной емкостью 300 каналов. Как и радиорелейные линии прямой видимости, тропосферные системы в будущем могут быть в определенной степени заменены спутниковыми системами связи (см. § 1.7).

1.6. Системы подводного кабеля (подводные усилители)

Подводные кабели для телеграфии были впервые разработаны еще до изобретения телефона *. Из-за значительно большей ширины полосы телефонного канала по сравнению с телеграфным телеграфные кабели могли использоваться для передач телефонной информации только на коротких расстояниях. Например, в 20-х годах нашего столетия была введена в эксплуатацию телефонная линия между Великобританией и Европой. Многоканальная связь на большие расстояния стала возможной только после разработки подводных кабельных усилителей, предназначенных для компенсации затухания кабеля и выравнивания его частотных характеристик. Первые такие усилители были разработаны Британским Почтовым ведомством в 1943 г., а первая система с глубоководными усилителями была проложена между Флоридой и Кубой в 1950 г. фирмой A. T. & T.

В этой системе для каждого направления передачи использовался отдельный кабель, емкость системы 24 канала, ширина полосы частот каждого канала 4 кГц. В том же году между Великобританией и Нидерландами был проложен кабель, рассчитанный для передачи сигналов 120 каналов (60 каналов в каждом направлении).

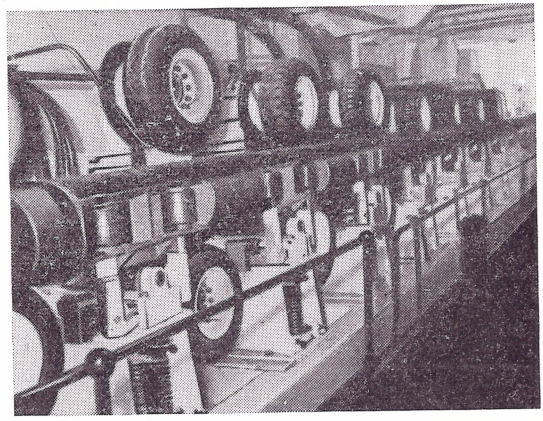
Первый трансатлантический кабель был проложен лишь в 1956 г. По этому кабелю при помощи системы, известной под названием TAT-1, было организовано 36 каналов. На глубоководном участке использовалось два кабеля, по одному для каждого направления. Число каналов позволила удвоить система TASI (использование речевых пауз). В 1959 г. емкость системы вновь бы-

[10] «Тонкая линия».

* Первая успешная прокладка трансатлантического телеграфного кабеля была осуществлена в 1866 г.

ла увеличена на 33% путем более тщательной фильтрации и сужением полосы частот каналов до 3 кГц.

Даже к 1963 г. емкость таких систем существенно не увеличилась (система ТАТ-3, проложенная в 1963 г., позволила организовать связь по 120 каналам). Однако начиная с 1964 г. емкость систем стала расти значительно быстрее, чем за предыдущие 15 лет. Сравнительно медленное развитие подводных систем частично объясняется появлением спутников связи. Ожидалось, что



Промежуточный усилитель, проходящий через линейную кабельную машину на борту кабельного корабля «Алерт»

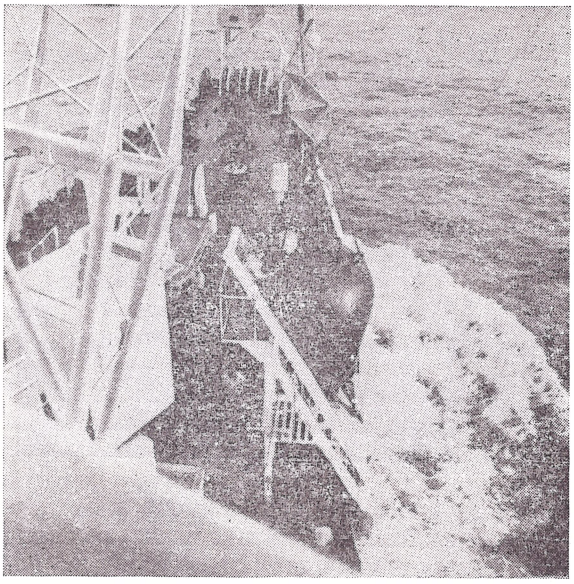
спутниковые системы исключат необходимость прокладки подводных кабелей. Однако позже стало ясно, что оба типа систем могут дополнять друг друга в глобальной сети. Кроме того, надежность транзисторов стала достаточной для применения их в усилителях с ожидаемым средним временем безотказной работы около 20 лет. Благодаря меньшему потреблению мощности стало возможным размещать усилители ближе друг к другу и, следовательно, передавать более широкую полосу частот. Первая система на твердотельных усилителях (от Великобритании до Бельгии) была организована в 1964 г., а первая трансатлантическая система (ТАТ-5) — в 1969 г.

Последний из проложенных трансатлантических кабелей между Канадой и Великобританией обеспечил работу системы CANTAT-II емкостью 1840 каналов (шириной в 3 кГц) в каждом направлении. Система введена в эксплуатацию в марте 1974 г. и аналогична системе, работающей по кабелю, проложенному между Испанией и Канарскими островами в 1971 г. Подводные усилители размещены на расстоянии 6 миль друг от друга в системе емкостью 1840 каналов; на кабеле, по которому работает CANTAT-II, установлено 600 усилителей. В системах меньшей емкости усилители расположены дальше друг от друга. Например, в системе емкостью 720 каналов на расстоянии 11 миль, в системе емкостью 48 каналов — 44 мили. Питание усилителей осуществляется по тому же кабелю от двух береговых станций.

073663

Напряжение питания на каждом конце кабеля системы CANTAT-II составляет порядка 10 кВ.

Двусторонняя передача по одному кабелю осуществляется путем деления линейного спектра на верхнюю и нижнюю полосу частот. На береговой станции верхняя полоса частот затем преобразуется в нижнюю. Обычно на глубоководных участках кабе-



Кабельный корабль «Алерт» готовится к установке маркерного буя во время прокладки кабеля с подводными усилителями между Великобританией и Испанией. Этот кабель, проложенный в 1970 г., обеспечил работу системы связи емкостью 640 дуплексных каналов ТЧ шириной 3 кГц. Линейный тракт системы со спектром частот до 5 МГц содержит 52 промежуточных усилителя при длине магистрали 480 морских миль (890 км)

ли имеют диаметр 1,5 дюйма[11]. На мелководных участках диаметр кабелей значительно больше за счет арматуры, предотвращающей их от повреждения тралами, кораблями, якорями и т. д.

Принципиально система, содержащая усилители аналоговых сигналов и малогабаритный кабель и работающая по принципу частотного уплотнения, может быть рассчитана и построена для передачи сигналов еще большего числа каналов. В настоящее время разрабатываются системы на 4000 каналов и нет признаков снижения потребностей в подводных кабелях.

1.7. Спутниковые системы

В октябре 1957 г. Советским Союзом был запущен на орбиту первый искусственный спутник Земли (Спутник-1). Спустя три месяца появился американский спутник «Explorer 1»[12]. В течение последующих 16 лет космическая техника развивалась с такой фантастической скоростью, как ни одна другая отрасль не развива-

[11] 1 дюйм = 2,54 см.

[12] «Исследователь 1».

лась в мирное время. Хотя основное внимание было направлено на исследования человеком космического пространства, однако столь же быстро развивалась космическая связь. В состав оборудования спутника, предназначенного для организации связи через космос (такой спутник обычно называют «спутником связи»), как правило, входят усилители УКВ сигналов. Первый экспериментальный спутник связи «Courrier» («Курьер») был запущен в 1960 г. Запуск спутников связи в коммерческих целях начался в 1962 г. спутником «Telstar» (совместная программа NASA-A.T.&T), который сначала транслировал телевизионные программы через Атлантический океан. Недостатком спутников «Telstar» I и II, а также «Relay» I и II является то, что из-за их низкой орбиты необходимо было применять очень дорогие наземные приемо-передающие станции, так как их пришлось оборудовать системами, обеспечивающими постоянное слежение антенн за положением спутников при движении их по небосводу. Один спутник находился одновременно в поле зрения передающей и приемной станций не более 20 мин.

В связи с этим все коммерческие спутники связи начали запускать на геостационарные орбиты, т. е. с вращением в восточном направлении над экватором на высоте 22 300 миль (35 800 км). Находясь на этой высоте, спутник совершает один оборот вокруг Земли точно за 24 ч. и поэтому кажется неподвижным в небе. Это позволяет строить наземные станции с очень ограниченной возможностью слежения и осуществлять связь в течение 24 ч. в сутки. Первые синхронные спутники из серии SYNCOM были запущены в 1963 и 1964 гг.

Глобальная система INTELSAT. Все перечисленные спутники были запущены по контракту с NASA (Национальное управление аэронавтики и космических исследований). Однако в 1962 г. постановлением о спутниках связи американский конгресс учредил корпорацию спутников связи (COMSAT), имеющую целью создание всемирной коммерческой системы спутниковой связи. Корпорация COMSAT выступает в качестве руководителя международного объединения спутников связи (INTELSAT), а также как организация, осуществляющая эксплуатацию космических связей. В объединение, основанное в 1964 г., первоначально входило 11 государств; сейчас в него входит 80 государств, осуществляющих 95% мирового обмена информацией по каналам дальней связи[13].

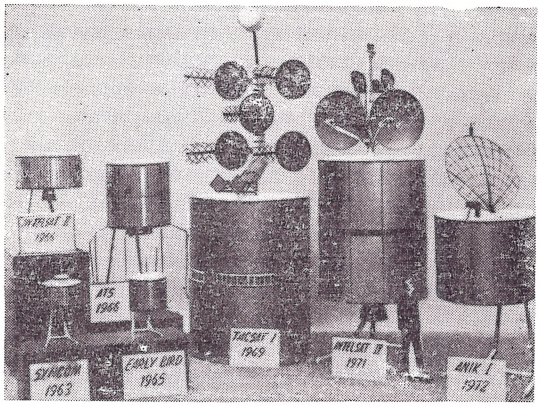
Первым спутником объединения INTELSAT был «Farly Bird»[14] (переименованный в «Intelsat I»). Запущенный в 1965 г. этот спутник обеспечивал передачу информации по 240 телефонным каналам или одному видеоканалу в течение трех лет через Атлан-

---

[13] В настоящее время в нашей стране вместо термина «дальняя связь» пользуются терминами «многоканальная связь» или «междугородная связь», поскольку «дальняя связь», т. е. связь на большие расстояния, осуществляется между городами по многоканальным системам.

[14] «Ранняя пташка».

тический океан. В 1967 г. на орбиту были выведены три спутника «Intelsat II», два из которых обеспечивали связь через Атлантический океан и один через Тихий океан. Имея оборудование для передачи информации по такому же числу каналов, что и «Intelsat I», эти спутники все еще работоспособны, хотя находятся в



Ряд спутников связи, запущенных на синхронные орбиты в 1965—1972 гг.

резерве. В 1968—1969 гг. связь через весь земной шар обеспечивали спутники «Intelsat III», орбиты которых проходили над Атлантическим, Тихим и Индийским океанами. Обладая в 4—5 раз большей мощностью, чем первые спутники, они обеспечивают связь по 1200 телефонным каналам или по четырем видеоканалам в каждом направлении. Сейчас на орбите находятся пять спутников «Intelsat III».

На этих спутниках находится по одному широкополосному приемопередатчику для каждого направления передачи. Спутник «Intelsat IV», содержит 12 приемопередатчиков (каждый с шириной полосы 36 МГц), позволяющих осуществлять связь по 9 000 телефонным каналам или 12 видеоканалам. При этом обеспечиваются возможность многократного доступа и одновременная передача. Первый такой спутник был запущен в 1971 г., а сейчас их уже пять над Атлантическим, Тихим и Индийским океанами. До сих пор все коммерческие спутники работали по принципу частотного уплотнения с частотной модуляцией, однако «Intelsat IV» приспособлен для передачи ИКМ сигналов (система SPADE). Передача в сторону спутников осуществляется в полосе частот 5,925—6,425 ГГц, а от спутников к земле — в полосе частот 3,700—4,200 ГГц. Спутники «Intelsat V», серия которых должна появиться в конце 70-х годов, будут работать по принципу временно́го уплотнения с многократным доступом (TDMA) в спектре от 12 до 14 ГГц.

Темпы, с которыми государства — члены объединения INTELSAT устанавливали наземные станции, свидетельствуют о завершении создания в скором времени поистине глобальной системы.

К 1969 г. работало 25 наземных станций в 15 странах. К марту 1973 г. их количество возросло до 85 в 53 странах. Еще 41 наземная станция находится в процессе строительства или проектирования.

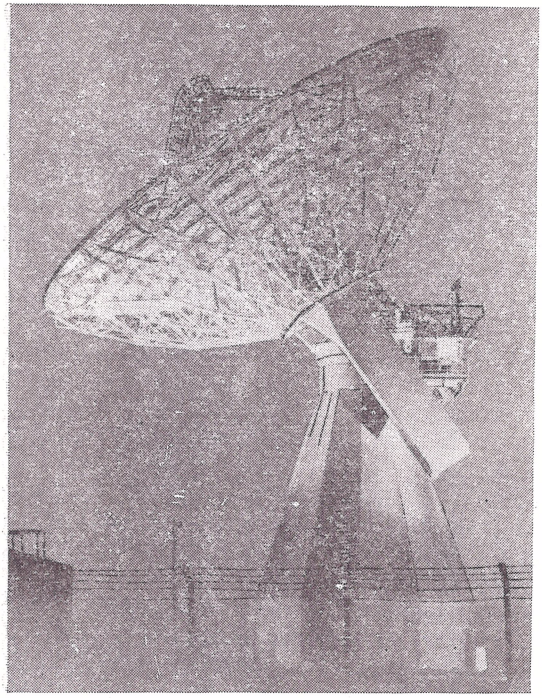
Местные системы. Кроме глобальной системы INTELSAT, существуют различные региональные или местные спутниковые системы связи, работающие или проектируемые. Первая такая система была организована в СССР после запуска спутника «Молния-1» в 1965 г. С помощью нескольких спутников этого класса, находящихся на несинхронных орбитах, сейчас осуществляется передача телефонной, видео- и факсимильной информации между 20 наземными станциями, расположенными в разных точках государства. Ожидается увеличение числа наземных станций примерно до 30.

Первая синхронная местная спутниковая система начала работать в январе 1973 г. в Канаде. В этой системе используется спутник «ANIK I», подобный спутнику «Intelsat IV»; эксплуатацию осуществляет фирма TELESAT. Мощная телефонная система емкостью 960 каналов создана между Аллан Парк (Онтарио) и Лэйк Ковечан (Британская Колумбия). Кроме того, имеется шесть сетевых телевизионных станций, обеспечивающих двусторонние видеоканалы между основными городами. В 24 точках менее населенной северной части страны размещены приемные телевизионные станции. И, наконец, имеется четыре телефонные линии (две емкостью 8 каналов и две емкостью 132 канала), соединяющие отдаленные Северные районы. В 1974 г. при помощи подводного кабеля CANTAT II (см. § 1.6) мощная система от Аллан Парк продлена до Херицфилд в Новой Шотландии.

В США ожидается организация местной системы. С этой целью различные фирмы обратились за разрешением в Федеральную комиссию связи. Ожидалось, что первые системы начнут работать к 1974 г. и, по-видимому, они будут принадлежать нескольким различным фирмам, поскольку, по крайней мере, пять заявок подано на рассмотрение Федеральной комиссии связи. Среди них — COMSAT, владелец системы INTELSAT.

Европейской организацией по исследованию космоса (ESRO) и Европейским союзом радиовещания (EBU) завершено исследование возможности замены сети Евровидения региональной спутниковой системой, осуществляющей передачу телефонной и цифровой информации, а также телевидения. Рассматриваемая в настоящее время система включает в себя около 30 наземных станций, размещенных от Северной Африки до Исландии и Скандинавского полуострова и от Португалии до Турции. Первоочередной задачей является запуск на орбиту к 1978 г. синхронного спутника, обслуживающего от 4 до 6 наземных станций. Создание системы должно быть закончено в начале 80-х годов[15].

[15] В связи со взрывом американской ракеты-носителя запуск спутника в конце 1977 г. не удался. Это, по-видимому, отодвинет сроки окончания создания системы.



Антенна (диаметром 90 футов) на наземной радио- и кабельной станции в Рас Абу Джайюре (Бахрейн). Эта станция работает со спутником связи Intelsat в районе Индийского океана

В Советском Союзе, кроме упомянутых автором спутников связи «Молния-1», осуществлен запуск усовершенствованных спутников связи «Молния-2» и «Экран», а в 1977 г. на стационарную орбиту с удалением 36 000 км выведен спутник связи «Радуга». Последний получил международную классификацию «Стационар-2». В конце 1977 г. выведен на эллиптическую орбиту спутник связи «Молния-3».

Глава 2 Терминология частотного уплотнения и модуляционные планы

2.1. Телефонный канал

Амплитудные характеристики сигнала, передаваемого по одиночному телефонному каналу[16], будут рассмотрены в гл. 5. Здесь же для возможности рассмотрения методов объединения каналов ТЧ

[16] Поскольку по телефонному каналу может осуществляться не только телефонная связь, в СССР принят термин «канал ТЧ». В дальнейшем изложении во всех случаях, когда имеется в виду не только телефонная связь, вместо термина «телефонный канал» принят термин «канал ТЧ».

в многоканальную систему необходимо оценить только полосу частот, занимаемую одиночным каналом.

Здесь мы сталкиваемся с неустоявшейся терминологией. Дело в том, что под «каналом» понимают, с одной стороны, совокупность оборудования для обеспечения передачи одного информационного сигнала (в том числе и телефонного), а с другой стороны, сам передаваемый сигнал. Представляется более точным изложить «объединение **сигналов** каналов ТЧ в многоканальный **сигнал**». Автор, таким образом, здесь придерживается второй трактовки термина «канал».

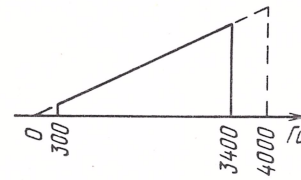
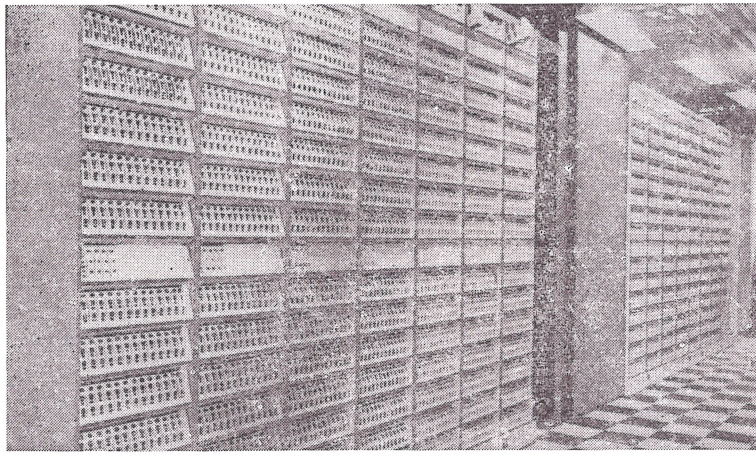


Рис. 2.1.1. Полоса частот канала ТЧ

На рис. 2.1.1 показано, что при частотном уплотнении каждый канал занимает полосу шириной 4 кГц. Однако речевой сигнал ограничивается фильтрами в диапазоне частот от 300 до 3400 Гц. На этом и последующих рисунках используются условные обозначения, принятые МККТТ. Полный перечень этих обозначений приведен в приложении 1. Показанные в этой главе модуляционные планы взяты из рекомендаций МККТТ и ДСА (см. библиографию).

2.2. Каналопреобразующее оборудование и первичные группы

Частоты сигналов каждого канала ТЧ в балансном модуляторе смешиваются с несущей частотой и затем проходят через полосовой фильтр с шириной полосы 4 кГц, который задерживает верхнюю боковую полосу частот и вносит дополнительное зату-



Стойки каналопреобразующего оборудования СТЕ (СИП). На фото показаны стойки общей емкостью 196 первичных групп (2252 канала ТЧ)

хание для подавленной несущей частоты. Далее нижние боковые полосы частот 12 каналов ТЧ с промежутками в 4 кГц объединяются и образуют первичную группу шириной 48 кГц. Оборудование, при помощи которого осуществляется преобразование частот сигналов 12 каналов ТЧ в общую группу, называется каналопреобразующим[17] (CTE). Сформированный таким образом групповой сигнал подается на стойку распределения первичных групп (GDF) и далее на оборудование последующих ступеней преобразования.

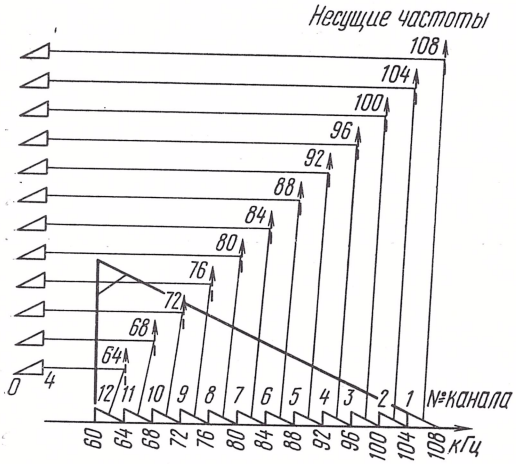


Рис. 2.2.1. Формирование спектра основной первичной группы (типа «В»)

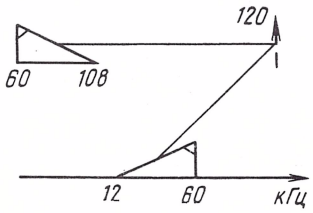


Рис. 2.2.2. Формирование спектра первичной группы типа «А» (прямой)

На всех ступенях преобразования при частотном уплотнении используется одна боковая полоса с подавленной несущей, как правило, нижняя боковая полоса. При этом на каждой ступени происходит инверсия частот. На рис. 2.2.1 показано объединение 12 каналов в основную первичную группу (типа В), расположенную в спектре от 60 до 108 кГц, причем показаны несущие и инвертированные частоты. Если частота в первичной группе увеличивается с ростом частоты в канале, группа называется прямой. Примером может служить первичная группа типа А в спектре от 12 до 60 кГц, образование которой из основной первичной группы типа В показано на рис. 2.2.2.

2.3. Преобразовательное оборудование первичной группы и вторичные группы

Преобразовательное оборудование первичной группы (GTE), в принципе, подобно каналопреобразующему оборудованию, однако в нем 5 первичных групп объединяются в одну 60-канальную

[17] В отечественных системах — «оборудование индивидуального преобразования».

вторичную группу. На рис. 2.3.1 показано объединение 5 основных первичных групп типа В в основную вторичную группу со спектром частот от 312 до 552 кГц. Поскольку на каждой ступени пре-

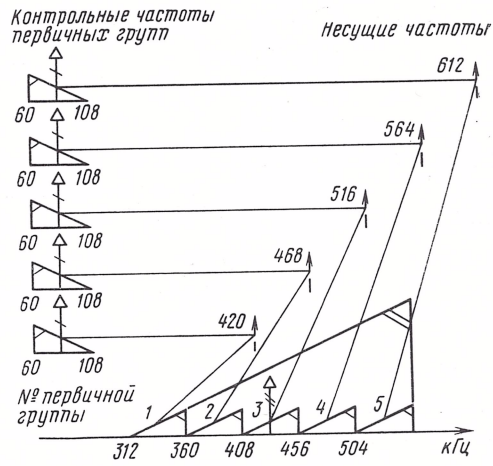


Рис. 2.3.1. Формирование спектра основной вторичной группы

образования происходит инверсия частот, основная вторичная группа является прямой, т. е. частоты расположены в том же порядке, как и в канале ТЧ.

2.4. Третичная группа

Третичная группа образуется из 5 вторичных групп и, следовательно, содержит 300 каналов ТЧ. На рис. 2.4.1 показано объединение вторичных групп в основную третичную группу со спектром

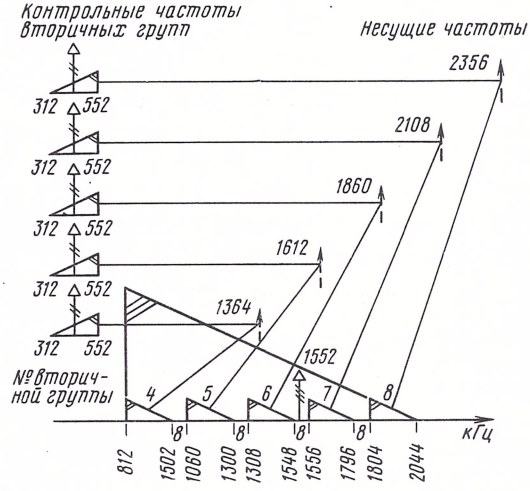


Рис. 2.4.1. Формирование спектра основной третичной группы

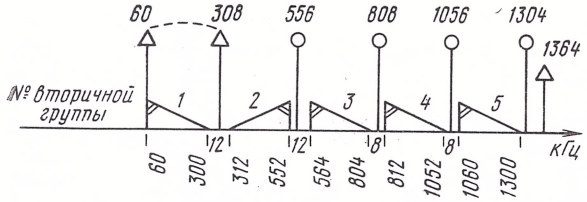


Рис. 2.4.2. Спектр частот линейного тракта международной системы с частотным уплотнением (до 1,3 МГц) коаксиального кабеля с парами 1,2/4,4 мм

частот от 812 до 2044 кГц. Третичная группа используется на последующих ступенях преобразования в системах большой емкости. Типичное расположение третичной группы в спектре 300-канальной системы (1,3 МГц) показано на рис. 2.4.2.

2.5. Четверичные группы и объединение вторичных групп

Как показано на рис. 2.5.1, основная четверичная группа состоит из трех третичных групп. Емкость этой группы — 900 каналов ТЧ, а полоса частот — от 8 516 до 12 388 кГц. На рис. 2.5.2

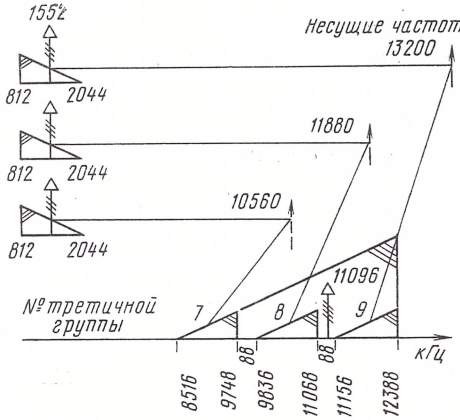


Рис. 2.5.1. Формирование спектра основной четверичной группы

показан способ образования спектра системы на 2700 каналов из трех основных четверичных групп.

В отечественных системах четверичные группы до сего времени не применяются. Линейный спектр системы К-1920, например, формируется непосредственно из спектров вторичных (ВГ) и третичных (ТГ) групп (см. рис. 2.5.2*а*). Подобным образом из ТГ формируются 1800-канальные спектры для системы К-3600 (см. рис. 2.5.2.*б*).

В системах меньшей емкости ступень третичного преобразования иногда исключается, и линейный спектр образуется непосредственно из объединенных вторичных групп. На рис. 2.5.3 показан способ образования линейного тракта на 960 каналов из 16 вто-

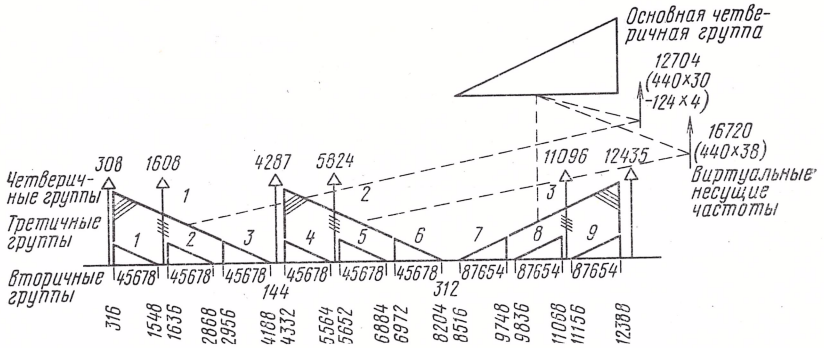


Рис. 2.5.2. Формирование спектра частот линейного тракта системы до 12 МГц

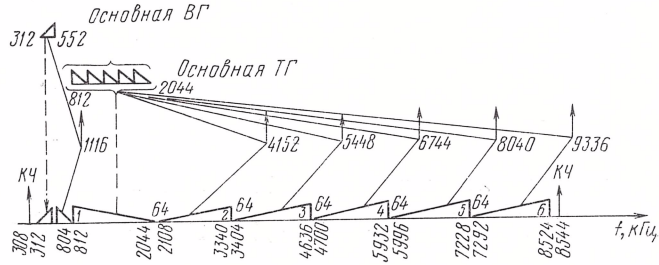


Рис. 2.5.2*а*. Формирование спектра частот линейного тракта отечественной системы К-1920 при передаче сигналов 1920 каналов ТЧ

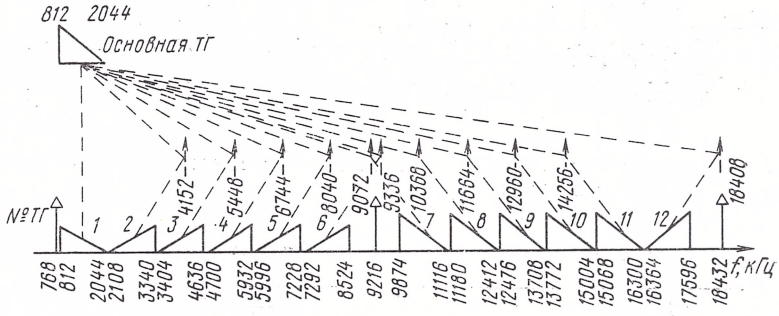


Рис. 2.5.2*б*. Формирование спектра частот линейного тракта отечественной системы К-3600 при передаче сигналов 3600 каналов ТЧ

ричных групп (гипергруппа)[18]. На рис. 2.5.4 показана система емкостью 1260 каналов, в которой используется модуляционный план системы на 960 каналов с добавлением еще 5 вторичных групп. На рис. 2.5.5 показана система емкостью 1800 каналов, образо-

[18] Таким способом формируется линейный спектр отечественной системы К-300 (см. рис. 2.5.3*а*).

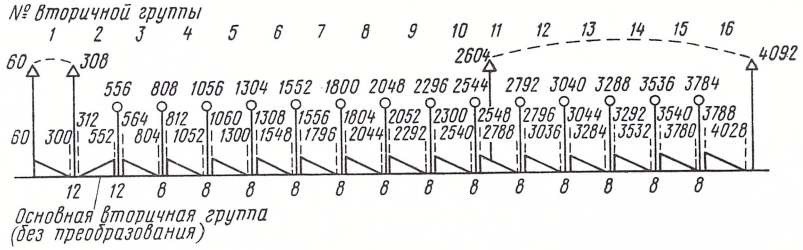


Рис. 2.5.3. Спектр частот линейного тракта системы емкостью 960 каналов ТЧ, сформированный из 16 вторичных групп

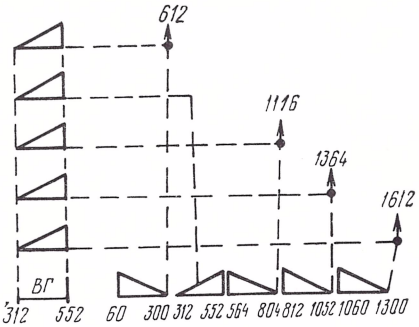


Рис. 2.5.3*а*. Формирование спектра частот линейного тракта отечественной системы К-300 из 5 вторичных групп

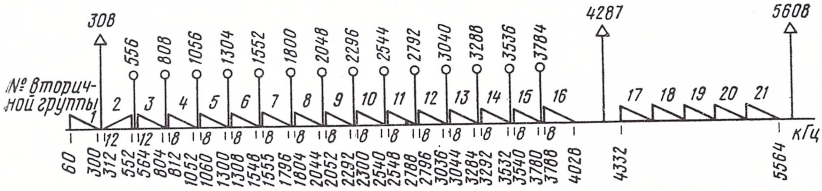


Рис. 2.5.4. Спектр частот линейного тракта системы емкостью 1260 каналов ТЧ, сформированный из 21 вторичной группы

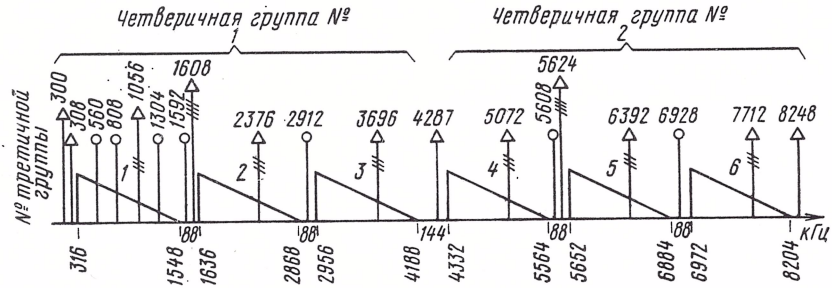


Рис. 2.5.5. Спектр частот линейного тракта системы связи емкостью 1800 каналов ТЧ

ванная либо из 2 четверичных групп, либо из 6 третичных групп. Линейный спектр систем емкостью 1800 и 2700 каналов ТЧ может быть также сформирован объединением 2 или 3 гипергрупп при помощи преобразовательного оборудования гипергрупп; при этом ступень третичного преобразования исключается.

2.6. Объединение сигналов каналов ТЧ и видеосигналов

Линейные тракты могут быть использованы как для передачи только сигналов каналов ТЧ или сигналов телевидения, так и для совместной передачи. На рис. 2.6.1 изображен типичный видеока-

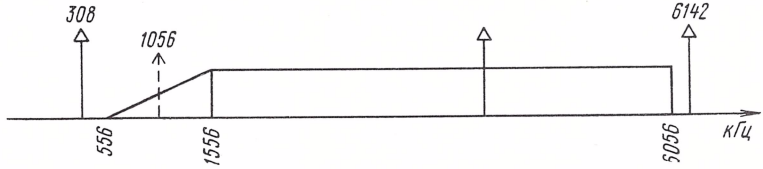


Рис. 2.6.1. Спектр телевизионного сигнала шириной 6 МГц

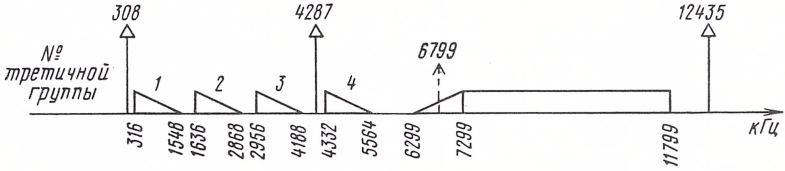


Рис. 2.6.2. Спектр частот линейного тракта системы до 12 МГц при одновременной передаче сигналов каналов ТЧ и телевидения

нал шириной 6 МГц с частично подавленной второй боковой полосой. На рис. 2.6.2 показан объединенный телефонный и телевизионный линейный спектр системы на 12 МГц.

Несколько иначе формируется спектр передачи телевидения в отечественных системах. Например, на рис. 2.6.2*а* показано формирование линейного спектра при одновременной передаче сигналов 300 каналов ТЧ и видеосигнала в системе К-1920.

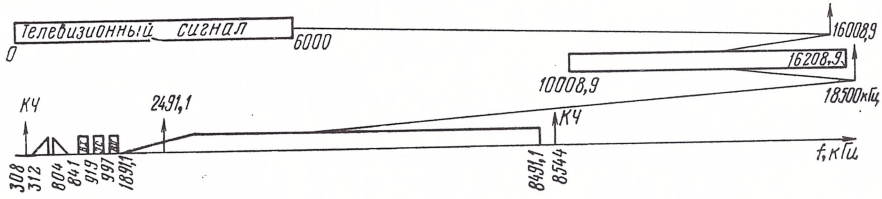


Рис. 2.6.2*а*. Спектр частот линейного тракта отечественной системы К-1920 при одновременной передаче сигналов 300 каналов ТЧ и телевидения

2.7.
Системы большой емкости

В § 1.3 описаны кабельные системы большой емкости, такие, как системы фирмы «Белл» типа L4 (17,5 МГц) и L5 (50 МГц), а также европейская система с диапазоном частот линейного тракта до 60 МГц. В аппаратуре фирмы «Белл» третичная группа образована из 10 вторичных и имеет емкость 600 каналов ТЧ. Шесть третичных групп объединяются для формирования линейного спектра системы емкостью 3600 каналов, спектр которых, расположенный в области частот от 564 до 17 548 кГц, используется

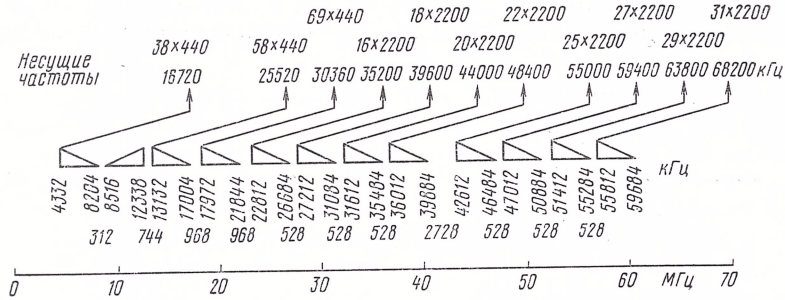


Рис. 2.7.1. Спектр частот линейного тракта системы емкостью 10 800 каналов ТЧ для уплотнения коаксиальной пары 2,6/9,5 мм

непосредственно в системе L4. В системе L5 пятнадцать 600-канальных групп образуют линейный спектр от 3124 до 51 532 кГц, что обеспечивает передачу 9000 каналов.

Линейный спектр частот европейской системы с диапазоном до 60 МГц и емкостью 10 800 каналов ТЧ эквивалентен 18 таким 600-канальным группам. На самом деле линейный спектр этой системы формируется из 12 основных четверичных групп или гипергрупп (см. рис. 2.5.1), каждая емкостью 900 каналов ТЧ, способ объединения которых показан на рис. 2.7.1.

2.8.
Контрольные частоты

На многих рисунках этой главы показаны контрольные частоты. Существуют четыре типа контрольных частот, которые могут быть введены в спектр многоканального сигнала при частотном уплотнении. Это эталонные контрольные частоты, линейные управляющие контрольные частоты, дополнительные измерительные частоты и контрольные частоты непрерывности (continuity pilots).

Эталонные контрольные частоты вводятся в преобразовательном оборудовании на различных ступенях преобразования. Например, контрольная частота первичной группы вводится в каждую первичную группу в каналопреобразующем оборудовании,

контрольная частота вторичной группы вводится в каждую вторичную группу в преобразовательном оборудовании первичных групп и т. д. Эталонные контрольные частоты автоматически оцениваются для предотвращения повреждений в преобразовательном оборудовании. Они могут быть также использованы в системах АРУ.

Линейные управляющие контрольные частоты вводятся в линейный спектр в промежутке между многоканальными блоками* или за пределами многоканального сигнала. Эти частоты используются для автоматической регулировки усиления линейного тракта, т. е для регулировки усиления кабельных промежуточных усилителей. Дополнительные измерительные частоты могут вводиться в линейный спектр при необходимости для определенных измерительных целей, например для измерения амплитудно-частотной характеристики тракта.

Continuity pilots используются только в радиосистемах, причем они вводятся на любом конце линейного спектра за пределами всех блоков каналов ТЧ и других контрольных частот. В приемнике они выделяются перед тем, как линейный спектр частот поступает в линию. Кроме определения непрерывности радиотракта, они используются в АРУ УКВ приемника.

Назначение КЧ в отечественных системах аналогичное. Здесь следует лишь отметить несущественную разницу в терминологии.

Глава 3 Единицы измерения помех в телефонных системах. Взвешивание

3.1. Единицы измерения мощности «пВт» и уровней мощности «дБм»

Это наиболее общеупотребительные абсолютные невзвешенные единицы, применяемые в европейских странах[19]. В США и некоторых других странах часто пользуются другими единицами (dBrn и dBa), которые будут описаны в § 3.8 и 3.12.

Под стандартным испытательным сигналом повсеместно понимают сигнал мощностью 1 мВт в точке нулевого уровня передачи (см. § 3.5). Поэтому принято определять другие сигналы в децибелах относительно одного милливатта, сокращенно дБм: 0 дБм→1 мВт[20].

---

* Многоканальным блоком могут быть первичная, вторичная, третичная группы и т. д. в зависимости от емкости системы и модуляционного плана.

[19] В том числе и в СССР.

[20] Автор пользуется для этого выражения знаком равенства (=). Поскольку приравнивать линейные и логарифмические единицы нельзя, здесь и далее знак «=» заменен на «→», т. е. следует читать «0 дБм соответствует 1 мВт».

Однако уровень помех в телефонных системах всегда значительно ниже 1 мВт. Поэтому в европейских странах определяют мощность помех в пиковаттах (10^{-12} Вт):

$$1 \text{ пВт} = 10^{-12} \text{ Вт} \rightarrow -90 \text{ дБм}.$$

3.2. Псофометрическое взвешивание в телефонных цепях

Для выяснения степени ухудшения качества передачи, вызванного мешающим действием помех на речевой сигнал в телефонном канале, было проведено следующее исследование. Большое количество тестов принималось на слух, причем на передаче в качестве помехи вводились сигналы различных частот. Степень мешающего действия помех определялась путем сравнения мощности сигнала каждой частоты с мощностью сигнала на частоте 800 Гц, которая по субъективной оценке слушателей оказывает такое же мешающее действие. Взвешивающая кривая МККТТ, полученная при помощи таких тестов, известна как кривая псофометрического взвешивания для коммерческих телефонных цепей. Эта

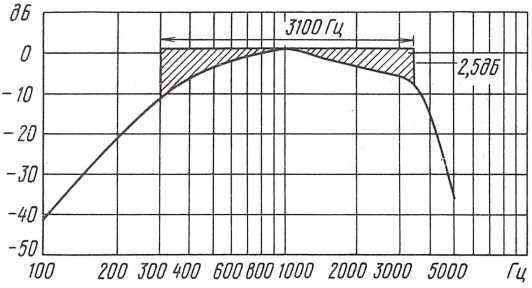


Рис. 3.2.1. Частотная характеристика псофометрического взвешивания для телефонных сигналов

кривая показана на рис. 3.2.1. Уровни помех в каналах, измеренные приборами с частотной характеристикой чувствительности, соответствующей такой кривой (псофометрами), более точно отражают фактическое мешающее действие шума, чем измеренные прибором с плоской частотной характеристикой.

Если шум с плоской частотной характеристикой в полосе частот телефонного канала от 30 до 3400 Гц пропустить через псофометрический фильтр, то уровень мощности этого шума уменьшается на 2,5 дБ, как показано штриховкой на рис. 3.2.1. Заметим, что относительный уровень 0 дБ будет на частоте 800 Гц, в то время как на частоте 1000 Гц он составляет +1 дБ, а на частоте 1200 Гц вновь уменьшается до 0 дБ. Все частоты ниже 800 Гц и выше 1200 Гц проходят через псофометрический фильтр с затуханием.

3.3. Псофометрические единицы мощности и уровни псофометрической мощности

Уровни мощности помех, измеренные псофометром, обозначают индексом «п», т. е. вместо «дБм» используют единицу «дБмп», а вместо «пВт» — «пВтп». Для гладкого шума в полосе 300—3400 Гц выполняются следующие соотношения:

$$p\,(\text{дБмп}) = p\,(\text{дБм}) - 2{,}5 \text{ дБ};$$

$$P\,(\text{пВтп}) = P\,(\text{пВт}) \times 0{,}56.$$

Здесь не лишне еще раз подчеркнуть (см. также ниже § 3.12), что сравниваются уровни мощности сигнала гладкого шума, измеренные псофометром при включенном и выключенном псофометрическом фильтре, т. е., например, первое приведенное соотношение следует в развернутом виде понимать следующим образом: уровень мощности сигнала гладкого шума, ограниченного граничными частотами 300 и 3400 Гц, измеренного псофометром при включенном псофометрическом фильтре, p децибел мощности псофометрических, численно равен уровню мощности того же сигнала, измеренного псофометром при выключенном псофометрическом фильтре в децибелах мощности минус 2,5 дБ.

Если же псофометром измерять синусоидальные колебания, то на частоте 800 Гц его показания при включенном и выключенном псофометрическом фильтре совпадут, а на остальных частотах разность показаний определяется частотной характеристикой затухания псофометрического фильтра.

3.4. Единицы плотности мощности

При объединении спектров частот отдельных каналов ТЧ в многоканальный спектр необходимо различать общую мощность во всей объединенной полосе частот и плотность мощности. Плотность мощности обычно выражается в «дБм на канал» шириной в 3100 Гц, но иногда применяются единицы «дБм на 1 кГц» и «дБм на 4 кГц». Эти единицы связаны следующими соотношениями:

$$p\,(\text{дБм/канал}) = p\,(\text{дБм/кГц}) + 5 \text{ дБ};$$

$$p\,(\text{дБм/4 кГц}) = p\,(\text{дБм/кГц}) + 6 \text{ дБ}.$$

Эти соотношения справедливы и для «дБмп».

3.5. Уровни в системах передачи и точка нулевого измерительного уровня

Многоканальные системы могут быть протяженными и сложными, содержать большое количество участков усиления и затухания передающей среды, промежуточных усилителей, модуляторов, демодуляторов и т. д. Говорить об уровне мощности сигнала, измеренной в такой системе, бессмысленно, если при этом не известно усиление или затухание в данной измерительной точке. Усиление или затухание сигнала в любой точке системы может быть опре-

делено только в том случае, если задан некоторый эталонный уровень для данной системы. Уровни мощности (напряжения, тока) сигнала в других точках системы (а следовательно, величины усиления или затухания сигнала) в этом случае могут выражаться в децибелах относительно этого эталонного уровня.

В многоканальной системе эта эталонная точка называется точкой нулевого измерительного уровня передачи (ТНИУ). Это такая точка, в которой абсолютная мощность стандартного измерительного сигнала равна 1 мВт или уровень мощности равен 0 дБм. Точка нулевого измерительного уровня часто расположена на передающей междугородной телефонной станции системы многоканальной связи.

3.6. Измерительный уровень передачи

Уровень в любой точке системы, выраженный в децибелах относительно ТНИУ, называется измерительным уровнем передачи в данной точке. Обычно этот уровень выражается в единицах dBr[21], хотя иногда применяется обозначение TL[21].

Например, уровень в точке —33 dBr (или —33 TL) системы на 33 дБ ниже, чем в ТНИУ.

В последнее время в отечественной литературе все чаще вместо термина «измерительный уровень передачи» применяется термин «относительный уровень передачи», что является дословным переводом английского relative transmission level. Между тем понятие «относительный уровень» более широкое и следует в каждом случае указывать, относительно какого уровня данный уровень является относительным. Поэтому в дальнейшем изложении применяется термин «измерительный уровень передачи», который означает частный случай относительного уровня передачи, измеренного относительно ТНИУ. Подробнее об этом см. [17], [18].

Единицы dBr (или TL) в СССР не получили широкого распространения. Обычно вместо них применяется словесное указание — «измерительный уровень *p* дБ». Для сокращения целесообразно ввести аналогичное обозначение, поэтому вместо dBr (TL) ниже введено дБи.

Поскольку мощность стандартного испытательного сигнала в ТНИУ равна 1 мВт (0 дБм), в любой другой точке системы уровень мощности этого сигнала в дБм численно равен уровню передачи в этой точке. Например, в точке —10 дБи стандартный испытательный сигнал должен иметь уровень —10 дБм. Любые отклонения от этого значения показывают, что система имеет избыточное усиление или затухание. Из определения следует, что измерительный уровень в точке нулевого измерительного уровня передачи равен 0 дБи.

3.7. Относительный уровень мощности

Следует подчеркнуть, что «дБи» означает измерительный уровень передачи в любой физической точке системы. Эти единицы не являются мерой мощности. Если измерен уровень мощности сигна-

[21] От английского Relative и Transmission Level (уровень передачи).

ла в любой точке системы в абсолютных единицах (т. е. в дБм), его можно сопоставить с номинальными уровнями загрузки, учитывая измерительный уровень передачи в этой же точке. Полученным таким образом уровням мощности присваивается дополнительный индекс 0.

Следовательно, уровни в дБм и дБм0 связаны соотношением

$$p(\text{дБм0}) = p(\text{дБм}) - p(\text{дБи}).$$

Преимущество единицы дБм0 состоит в том, что уровень мощности в дБм0 можно сразу сопоставить с номинальными уровнями загрузки системы; при этом нет необходимости задавать уровень передачи в той точке, где измерен этот уровень мощности. Из определения ТНИУ и дБи следует, что уровень мощности сигнала, измеренный в точке нулевого измерительного уровня передачи и выраженный в дБм0, численно равен его абсолютному уровню мощности в дБм. Очевидно также, что уровень мощности стандартного испытательного сигнала во всех точках системы должен составлять 0 дБм0.

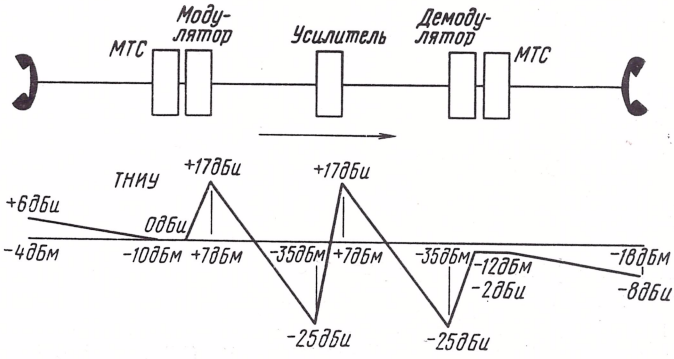


Рис. 3.7.1. Диаграмма измерительных уровней передачи

Индекс 0 применяется также для обозначения уровней мощности и мощности, выраженных в дБмп, пВт и пВтп и приведенных к ТНИУ. Таким образом появляются единицы дБм0п, пВт0, пВт0п.

На рис. 3.7.1 иллюстрируются понятия точки нулевого измерительного уровня передачи и измерительного уровня передачи в дБи на примере диаграммы уровней упрощенной телефонной связи. Два абонента соединяются через две междугородные станции (МТС) и многоканальную кабельную систему, содержащую один промежуточный усилитель. На коммутаторах осуществляются модуляция и демодуляция. Усиление и затухание участков системы вызывают изменение уровней мощности сигнала в пределах от +7 до —35 дБм. Сравнение измерительного уровня передачи в дБи и уровня мощности в дБм показывает, что уровень мощности сигнала, пересчитанный в точку с нулевым измерительным уровнем, равен —10 дБм0 во всех точках данной системы. Теперь,

конечно, понятен смысл уровня —10 дБм0. С другой стороны, говорить об уровне мощности —35 дБм бесполезно, если не указывать, что он должен быть измерен в точке с уровнем —25 дБи.

3.8. Взвешивание контуром типа 144 — единица измерения уровней мощности помех dBrn (144-line)

В США псофометрическое взвешивание применяется редко. В этой стране обычно пользуются тремя взвешивающими характеристиками, полученными экспериментально при помощи тестов, аналогичных описанным в § 3.2 для псофометрического взвешивания. Изменение этих характеристик было вызвано тем, что с годами улучшалось качество телефонных аппаратов.

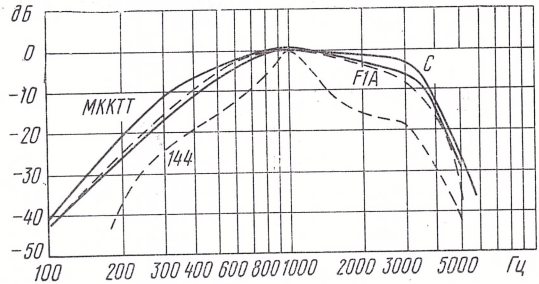


Рис. 3.8.1. Взвешивающие характеристики приборов для измерения помех в телефонных цепях:

144 — взвешивающая характеристика, соответствующая частотной характеристике телефонного аппарата типа 144; FIA — взвешивающая характеристика FIA; C — взвешивающая характеристика контура типа C; МККТТ — характеристика псофометрического взвешивания, рекомендованная МККТТ в 1951 г.

Первым телефонным аппаратом, широко распространенным в США, был настольный аппарат типа 144 фирмы «Western Electric». Он преобладал в 20—30-х годах. В этот период для оценки величины помех были разработаны различные измерительные приборы. Однако только в 1937 г. с появлением измерителя шума типа 2А стало возможным эффективно проводить «взвешенные» измерения. Взвешивающая характеристика прибора типа 2А применительно к аппарату типа 144 изображена на рис. 3.8.1. Выделяющийся «пик» вблизи частоты 1 кГц свидетельствует о сравнительно плохой частотной характеристике этого телефонного аппарата.

Гладкий шум в спектре частот от 300 до 3400 Гц, проходя через фильтр с характеристикой, соответствующей частотной характеристике аппарата типа 144, претерпевает затухание 8 дБ.

Появление электронных измерителей шума (типа 2А) позволило для измерения уровня мощности помех ввести шкалу в децибелах. При этом за исходное значение был принят уровень сигнала с частотой 1000 Гц, на которой аппарат типа 144 имеет нулевое затухание, и мощностью 1 пВт. Такой выбор определялся главным образом предположением, что наименьшая измеряемая мощность шума будет более 1 пВт0, поэтому все уровни помех будут выражаться в децибелах со знаком плюс. О такой шкале мож-

но сказать, что она показывает превышение в децибелах уровня измеряемых помех над исходным уровнем мощности помех. В соответствии с первыми буквами английских слов reference noise (дословно «относительный шум») единица измерений, принятая для шкалы прибора типа 2А, получила обозначение dBrn[22]. Поскольку мощность помех, соответствующая нулевому значению уровня помех по этой шкале, равна 1 пВт, получаем следующую зависимость:

0 dBrn → 1 пВт → — 90 дБм.

Единица измерений уровней мощности помех, проводившихся со взвешивающим контуром типа 144 (названным так по типу телефонного аппарата 144), была названа dBrn (144-line), и для гладкого шума в спектре частот от 300 до 3400 Гц

0 dBrn (144 = line) → 8 dBrn → — 82 дБм.

Заметим, что исходная частота 1000 Гц (которой пользовались и в следующих взвешивающих контурах в США) отличается от исходной частоты в европейских псофометрах (800 Гц).

3.9. Взвешивание контуром типа F1A — единица измерений уровней мощности помех dBa (F1A)

В конце 30-х годов был разработан новый телефонный аппарат типа 302, а затем появилась новая взвешивающая характеристика F1A. Эта кривая, показанная на рис. 3.8.1, свидетельствует о том, что частотная характеристика нового аппарата значительно улучшена. Гладкий шум с полосой 300—3400 Гц, проходя через взвешивающий фильтр F1A, ослабляется на 3 дБ, т. е. на 5 дБ меньше, чем для аппарата типа 144.

В измерителе помех типа 2В, разработанном в 1941 г. и имеющем взвешивающую характеристику F1A, за исходный был принят уровень —85 дБм (3,16 пВт), который был выше прежнего исходного уровня на 5 дБ. Это означает, что при использовании фильтров типа F1A и 144-line должны быть получены одинаковые результаты, поскольку увеличение исходного уровня на 5 дБ компенсируется равным увеличением чувствительности нового аппарата к гладкому шуму.

Новая шкала прибора 2В при измерениях уровней мощности помех с фильтром F1A показывала превышение в децибелах измеряемого уровня над измененным исходным уровнем и была проградуирована в единицах dBa (F1A). Для гладкого шума в спектре 300—3400 Гц

0 dBa (F1A) → 3 dBa → — 82 дБм;

0 dBa (F1A) → 0 dBrn (144 - line).

---

[22] Здесь и далее единицы, не получившие широкого применения в СССР, даются без перевода.

3.10. Взвешивание контуром типа С — единица измерения уровней мощности помех dBrnC

Телефонный аппарат типа 500, появившийся в конце 50-х годов, явился причиной создания третьей взвешивающей характеристики типа С, которая также показана на рис. 3.8.1. В результате улучшения частотной характеристики телефонного аппарата типа 500 по сравнению с аппаратом типа 302 затухание гладкого шума в полосе 300—3400 Гц составило всего 1,5 дБ. Чтобы сохранить численное равенство, аналогичное установленному ранее между dBa (F1A) и dBrn (144-line), потребовалось бы дальнейшее увеличение исходного уровня шума. Учитывая снижение уровней помех, это привело бы к появлению результатов измерения с отрицательным знаком. Поэтому было решено вернуться к исходной мощности в 1 пВт и была «воскрешена» единица dBrn.

В 1960 г. был выпущен измеритель шума типа 3А со шкалой, проградуированной в dBrn, а при измерениях с контуром типа С — в dBrnC. Для гладкого шума в полосе частот 300—3400 Гц справедливо следующее соотношение:

$$0\ \text{dBrnC} \rightarrow 1{,}5\ \text{dBrn} \rightarrow -88{,}5\ \text{дБм}.$$

Сравнение dBa (F1A) и dBrnC показывает, что разница между ними составляет 6,5 дБ. Однако принято округлять это значение, увеличивая dBrnC, в результате чего

$$p\,(\text{dBrnC}) = p\,(\text{дБм}) + 88\ \text{дБ} = p\,[\text{dBa (F1A)}] + 6\ \text{дБ}$$

или $p\,(\text{dBrnC}) = p\,[\text{dBrn (144 - line)}] + 6$ дБ.

3.11. Соотношения между американскими и европейскими единицами измерения уровней мощности помех

Из соотношений, действительных для гладкого шума, 0 дБм→ →—2,5 дБмп и 0dBa (F1A)→—82 дБм следует, что 0dBa (F1A)→ →—84,5 дБмп. Однако по соглашению (например, между Британским Почтовым ведомством и концерном «Белл») величина 0,5 дБ опускается. При этом получаем следующее соотношение:

$$0\ \text{dBa (F1A)} \rightarrow -84\ \text{дБмп},$$

откуда $p\,[\text{dBa (F1A)}] = 10 \lg P\ (\text{пВтп}) - 6$ дБ.

Последнее выражение особенно важно, поскольку многие стандарты европейских стран и рекомендации МККР и МККТТ определяют требования к величинам мощности помех в пВтп, а концерн «Белл» пользуется единицей dBa (F1A). Поскольку единицы dBrnC и dBa (F1A) отличаются приблизительно на 6 дБ, справедливо также следующее соотношение:

$$p\,(\text{dBrnC}) \approx p\,(\text{дБмп}) + 90\ \text{дБ} = 10 \lg P\,(\text{пВтп}).$$

На самом деле взвешивание контуром С и псофометрическое взвешивание шума с полосой 300—3400 Гц дают результаты, отличающиеся на 1 дБ (—1,5 и —2,5 дБ). Следовательно, приве-

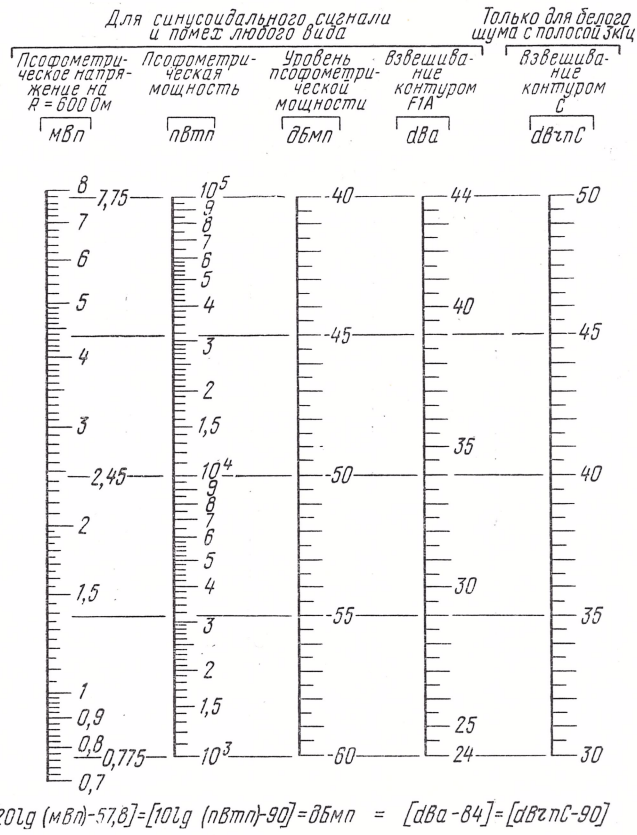


Рис. 3.11.1. Диаграмма для пересчета единиц измерения помех при взвешивании контурами: псофометрическим, типа FIA и типа С.

Исходные данные для построения диаграммы:
1) p, дБмп=p, dBa — 84.
2) Невзвешенная мощность белого шума с полосой 3 кГц соответствует +82dBa=+88,5dBrnC, округленно +88dBrnC.
3) 1 мВт=10^9 пВт→775 мВ на сопротивлении 600 Ом→0 дБм.

Показания различных приборов для измерения уровней мощности помех, отградуированных по синусоидальному сигналу мощностью 1 мВт, соответствуют:
+85 dBa на частоте 1000 Гц при взвешивании контуром типа FIA;
+90dBrnC на частоте 1000 Гц при взвешивании контуром типа С;
0 дБм на частоте 800 Гц — псофометр с кривой МККТТ 1951 г.

Диаграмму можно использовать для пересчета единиц в диапазонах A — E, имеющих следующие пределы:

	мВп	пВтп	дБмп	dBa	dBrnC
A	775	10^9	0	+84	90
	77,5	10^7	—20	+64	70
B	7,75	10^5	—40	+44	50
C	0,775	10^3	—60	+24	30
D	0,0775	10	—80	+4	10
E	0,0245	1	—90	—6	0

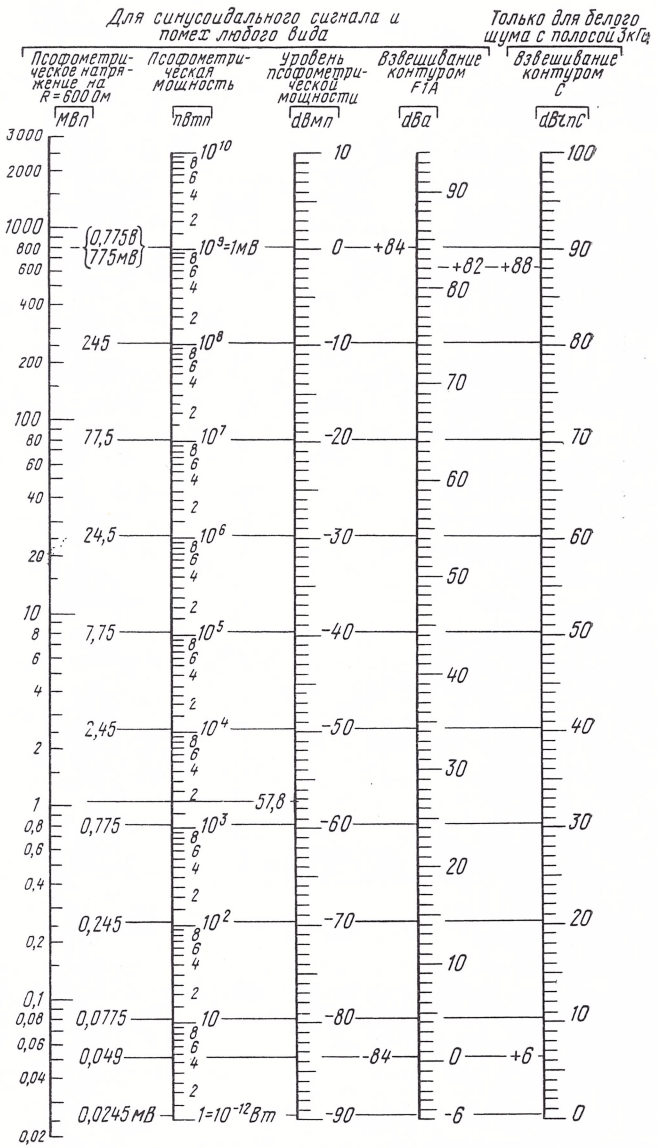


Рис. 3.11.2. Диаграмма для пересчета единиц измерения помех при взвешивании контурами: псофометрическим, типа FIA и типа С.

Исходные данные для построения диаграммы:
1) p, дБмп=p, dBa — 84.
2) Невзвешенная мощность белого шума с полосой 3 кГц соответствует +82dBa=+88,5dBrnC, округленно +88dBrnC.
3) 1 мВт=10^9 пВт→775 мВ на сопротивлении 600 Ом→0 дБм.
Показания различных приборов для измерения уровней мощности помех, отградуированных по синусоидальному сигналу мощностью 1 мВт, соответствуют:
+85dBa на частоте 1000 Гц при взвешивании контуром типа FIA;
+90dBrnC на частоте 1000 Гц при взвешивании контуром типа С;
0 дБм на частоте 800 Гц — псофометр с кривой МККТ 1951 г.

денная выше формула дает ошибку в 1 дБ. Однако это является общепринятым приближением.

Для перехода от единиц измерения уровней мощности помех при псофометрическом взвешивании к единицам измерения при взвешивании контурами типа F1A и типа C можно пользоваться рис. 3.11.1 и 3.11.2 соответственно для диапазонов уровней 20 и 100 дБ.

3.12. Гармонические сигналы и нестандартные полосы частот

В предыдущих параграфах была показана связь между взвешенными и невзвешенными единицами измерения уровней мощности помех для гладкого шума в полосе 300—3400 Гц. Расчетные коэффициенты, устанавливающие соотношения для измерения уровней мощности гладкого шума в других полосах частот, можно определить при помощи взвешивающих кривых.

Для одиночного гармонического сигнала эта связь может быть определена непосредственно по кривым. Например, при сигнале с частотой 800 Гц и уровнем мощности 0 дБм псофометр покажет 0 дБмп. При сигнале с частотой 1000 Гц и уровнем мощности 0 дБм измерительные приборы с соответствующими взвешивающими контурами покажут значения: 90 dBrn (144-line), 90 dBrnC и 85 dBa (F1A).

Глава 4 Требования к мощности помех в многоканальных системах

4.1. Рекомендации и стандарты

Стандарты, касающиеся как требований к проектированию, так и характеристик существующих многоканальных систем связи разрабатываются, вероятно, большинством организаций, связанных с телефонией. Стандартизация таких параметров, как модуляционные планы, контрольные частоты и уровни, уровни передачи оборудования преобразования и распределения и т. д., необходима для обеспечения совместимости систем в пределах одного ведомства связи. Международная стандартизация приобретает чрезвычайно важное значение для магистралей, пересекающих национальные границы. Поэтому для предотвращения несовместимости разрабатываются системы, соответствующие рекомендациям МККТТ и МККР. Многие национальные организации применяют

рекомендации МККТТ и МККР также и для своих национальных систем[23].

Хотя стандарты концерна «Белл» подобны рекомендациям МККТТ и МККР, все же этот концерн разрабатывает собственные рекомендации, известные под названием «Bell System Practices (BSP)». Совместимость систем, пересекающих границы различных провинций Канады, обеспечивается соответствием характеристик систем требованиям, изложенным в документе «Trans Canada Guidlines», разработанном Трансканадским техническим комитетом. Военные системы связи США учитывают требования как MIL-STD (военные стандарты), так и Оборонного ведомства связи (DCA).

Стандарты не только учитывают «механику» многоканальных систем связи в целях обеспечения их совместимости, но в значительной степени касаются качества обслуживания. Одним из важнейших показателей качества является отношение сигнал/помеха в телефонном приемнике. Поэтому были разработаны рекомендации, определяющие требования к характеристикам помех многоканальных систем. Эти требования заданы как для гипотетических цепей с точно определенными характеристиками (эталонные гипотетические цепи — ЭГЦ), так и для систем, устанавливаемых на реальных линиях.

Требования к характеристикам помех рассмотрены в § 4.2 и 4.3. В качестве примеров приведены рекомендации МККТТ, МККР, DCA и MIL-STD. Рекомендации для систем, применяемых на национальных или ведомственных сетях, не приводятся, поскольку они обычно не предназначаются для широкой публикации.

4.2. Эталонные гипотетические цепи (ЭГЦ)

Эталонную гипотетическую цепь МККТТ и МККР определяют следующим образом:

«Эталонная гипотетическая цепь представляет собой полную телефонную цепь (на каждом конце которой имеются оконечные устройства тональной частоты), организованную по гипотетической международной системе уплотнения определенной длины, содержащую определенное количество переприемов по первичной, вторичной и третичной группам, причем количество переприемов достаточно велико, но не максимально возможное».

Для систем разных типов и различной емкости заданы различные эталонные гипотетические цепи. Все ЭГЦ, разработанные МККТТ и МККР, имеют длину 2500 км (1550 миль). В концерне «Белл» длина ЭГЦ составляет 4000 миль, а в DCA — 1000 и

[23] В СССР также в основном приняты рекомендации этих международных комитетов, в работе которых советские специалисты принимают активное участие.

6000 морских миль[24]. На рис. 4.2.1 и 4.2.2 показаны две типичные ЭГЦ: одна для радиорелейной системы, другая — для системы по коаксиальному кабелю. Условные обозначения пояснены в приложении 1.

Для каждой ЭГЦ нормируют характеристики помех. Обычно задают максимально допустимую величину средней за час псо-

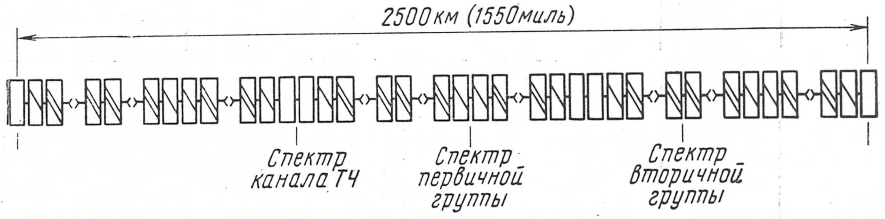


Рис. 4.2.1. Эталонная гипотетическая цепь МККР для систем РРЛ емкостью более 60 каналов ТЧ

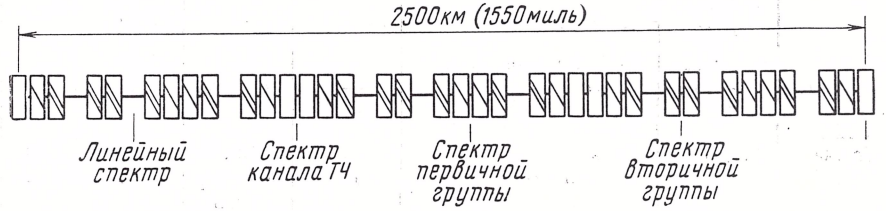


Рис. 4.2.2. Эталонная гипотетическая цепь МККТТ для систем уплотнения коаксиального кабеля с диапазоном частот линейного тракта до 4 МГц

фометрической мощности в пиковаттах в точке нулевого измерительного уровня (см. гл. 3). Значение допустимой для данной ЭГЦ мощности помех является основной характеристикой при проектировании и разработке многоканальных систем связи. Если реальная линия по длине и числу ступеней преобразования очень близка к эквивалентной ЭГЦ, то следует ожидать, что измеренные на ней характеристики помех будут соответствовать характеристикам ЭГЦ.

В табл. 4.2.1 приведены основные параметры различных эталонных гипотетических цепей. Из сравнения норм МККТТ, МККР и DCA на километрическую мощность помех видно, что эти нормы в значительной степени подобны друг другу. Например:

	МККР/МККТТ	DCA
Воздушные линии, пВтп/км	7	6,6
Симметричный кабель, пВтп/км	3	2,6
РРЛ (тропосферные и прямой видимости), пВтп/км . . .	3	1,8

К ЭГЦ военных стандартов США (MIL-STD) предъявлены гораздо более слабые требования. Это является следствием тактических особенностей систем министерства обороны США. Если

[24] 1 морская миля = 1,852 км.

Таблица 4.2.1. **Сравнение характеристик ЭГЦ, рекомендуемых МККТТ,**

Источник	Рекомендация	Тип системы связи (направляющая система)	Емкость каналов ТЧ	Общая длина, км	Число участков с линейным спектром частот или радиоспектром	Число промежуточных станций
МККТТ	G 311	Воздушная	12 + 12	2 500	6	—
	G 322	Симметричный кабель	До 120	2 500	6	—
	G 338	Коаксиальный кабель	До 960	2 500	9	—
	G 332	— » —	До 2700	2 500	9	—
	G 333	— » —	До 10 800	2 500	9	—
МККР	391 393-1	РРЛ прямой видимости	12—60	2 500	6	—
	392 393-1	— » —	>60	2 500	9	—
	396-1 397-2	Тропосферная РРЛ	До 120	2 500	2500/L	—
Министерство обороны США	MIL-STD-188	РРЛ прямой видимости	—	200 миль	6	6
То же	То же	То же	—	1 000 миль	6	36
DCA	330-175-1	Воздушная	12	1 000 мор. миль	—	—
		Симметричный кабель	12—60	1 000 мор. миль	—	—
		Любой, включая РРЛ	—	6 000 мор. миль	18	—

системы DCA рассчитаны в основном на стационарное использование и к ним предъявляются такие же требования, как к системам общегосударственного пользования, то ЭГЦ MIL-STD длиной 200 миль отражает требования, предъявляемые к чрезвычайно маневренным системам, подвергающимся частой передислокации. Предполагается, что вторая ЭГЦ MIL-STD, имеющая большую протяженность (1000 миль), должна быть более стабильной, поэтому требования в отношении характеристик помех для нее более жесткие.

Для эталонной цепи концерна «Белл» длиной 4000 миль норма на величину уровня мощности помех составляет 38 dBa0, что эквивалентно 25 000 пВтп (см. § 3.11). Эта норма учитывает и помехи, возникающие в оконечном оборудовании. В пересчете на единицу длины нормируемая концерном «Белл» мощность помех составляет 6,25 пВтп/милю, что соответствует 3,9 пВтп/км. Аналогичное требование МККТТ и МККР составляет 4 пВтп/км (10 000 пВтп на 2500 км). Таким образом, американские и европейские требования почти идентичны.

Число пар преобразователей—модулятор—демодулятор					Средняя за час псофометрическая мощность помех			
Индивидуальное преобразование	ПГ	ВГ	ТГ	Преобразование более высших ступеней	Суммарная мощность помех, пВтп	Мощность помех, вносимых преобразовательным оборудованием, пВтп	Мощность помех вносимых линейным трактом, пВтп	То же, пВтп/км
3	6	—	—	—	20 000	2 500	17 500	7
3	6	6	—	—	10 000	2 500	7 500	3
3	6	9	—	—	10 000	2 500	7 500	3
3	3	6	9	—	10 000	2 500	7 500	3
1	3	3	6	9	10 000	2 500	7 500	3
3	6	6	—	—	10 000	2 500	7 500	3
3	6	9	—	—	10 000	2 500	7 500	3
3	6	6	—	—	10 000 или не оговаривается	2 500	7 500 или не оговаривается	3 или не оговаривается
—	—	—	—	—	150 000	—	—	470
—	—	—	—	—	54 000	7 500	46 500	29
—	—	—	—	—	14 800	2 500	12 300	6,6
—	—	—	—	—	7 400	2 500	4 900	2,6
6	12	18	—	—	25 000	5 000	20 000	1,8

4.3. Допустимые помехи в цепях реальных линий

Если построение системы не слишком отличается от ЭГЦ, следует ожидать, что средний за час уровень мощности помех в этой системе будет соответствовать заданному для ЭГЦ, но в пересчете на фактическую длину системы. Если же реальная цепь существенно отличается от ЭГЦ, то может быть допущено некоторое послабление. Кроме среднечасовой мощности помех, система должна соответствовать другим требованиям в отношении помехозащищенности. Обычно это максимальное время за месяц в процентах, в течение которого допускаются более высокие уровни мощности помех.

Требования по помехам, приведенные в материалах МККТТ и МККР, сведены в табл. 4.3.1. В ней, кроме того, перечислены номера рекомендаций (см. также библиографию).

Таблица 4.3.1. **Требования, приведенные в Рекомендациях МККТТ и**

Типы систем				Общие требования					
				Системы уплотнения кабелей [2] или РРЛ		Однократная космическая связь	Системы уплотнения подводного кабеля[2]	Все системы	
1				2		3	4	5	
Рассматриваемые телефонные цепи[1]				Национальные 4-проводные и международные цепи длиной от 250 до 2 500 км	Цепи от 2 500 до 25 000 км	Цепи от 7 500 до 15 000 км	Цепи от 2 500 до 25 000 км	Цепь из шести международных цепей	
Рекомендации	МККТТ			G 152 G 212[3] G 222 G 226	G 153		G 153	G 143	G 143
	МККР			391, 392 393, 394 395, 396-1, 397-1		352, 353			
Рассматриваемая ЭГЦ или другая типичная цепь				ЭГЦ 2500[4] км или реальная цепь между пунктами переприема по ТЧ	Цепь протяженностью 7500[4] км	Основная ЭГЦ длиной по крайней мере 7500 км		Связь на расстоянии до 25 000 км	Связь на расстоянии более 25 000 км
Рекомендуемые значения	Псофометрическая мощность	Величина средней за час мощности помех	Суммарная мощность помех		10 000 пВтп				50 000 пВтп
			Мощность помех преобразовательного оборудования		2500 пВтп				На все преобразования около 7000, но менее 9000 пВтп
			Мощность помех линейного тракта		7500 пВтп, т. е. 3 пВтп/км	15 000* пВтп 2 пВтп/км или меньше[5]	10 000* пВтп	1[5] пВтп/км	Около 1,5 пВтп/км	1 пВтп/км для каждого участка длиннее 2500 км

МККР в отношении мощности помех в каналах ТЧ

Распределение мощности помех в национальной системе	Специфические требования: Связь на очень короткие расстояния	Радиорелейные линии					Тропосферные линии в особых условиях	Связи по воздушным линиям	
6	7	8					9	10	
	Не более двух цепей в каждой из двух оконечных национальных цепей	Цепи, незначительно отличающиеся от ЭГЦ $280 \leqslant L < 2500$ км	Сочетание линий, значительно отличающихся от ЭГЦ: $50 < L \leqslant 280$ км	$280 < L \leqslant 840$ км	$840 < L \leqslant 1670$ км	$1670 < L \leqslant 2500$ км	Не более одной-двух цепей в международной связи	Связь до 2 500 км	Связь расстояние, превышающее 2500 км
G 123	G 125							G 311	G 153
		395	395	395	395	395	396, 397		
Общая длина, км, междугородных многоканальных систем с частотным разделением сигналов							ЭГЦ 2500[4] км	ЭГЦ 2500[4] км	Цепь длиной 10 000 км
(4000+4L) или (7000+2L) пВтп	Не более 1000[7] пВтп							20 000[6] пВтп	50 000[6] пВтп
								2500 пВтп	
		3 L пВтп	(3L+200) пВтп		(3L+ +400) пВтп	(3L+ +600) пВтп		17 500 пВтп	

1			2		3	4	5		
	Величина средней за минуту мощности помех, превышаемой в течение 20% месяца	Линейный тракт	7500 пВтп		10 000* пВтп				
	Процент времени в месяц, в течение которого средняя за минуту мощность помех превышает указанную величину	47 500 50 000 63 000 пВтп	0,1	0,3*	0,3*				
Невзвешенная мощность помех	Процент времени в месяц, в течение которого превышается 100 000 пВт (5 мс)		0,01	0,03*	0,03*				

Общие замечания. Все величины, приведенные в этой таблице, относятся к точмы. Кроме того (Рекомендация G123 МККТТ), псофометрическая ЭДС помех, вызванных жимах абонентского аппарата. Средняя величина мощности помех в ЧНН, вносимых 4-про-200 пВт0п. Невзвешенные помехи, вносимые при коммутации, должны иметь мощность не

[1] Специальные требования к качеству передачи телеграфных сигналов приведены в

[2] Для этих систем считается достаточным контролировать выполнение требований толь-

[3] В этой рекомендации приведены подробные сведения о рассматриваемых ЭГЦ.

[4] Если линейный тракт систем, рассматриваемых в данной колонке, имеет меньшую протем пересчета приведенных значений пропорционально длине тракта.

[5] Для самых низкокачественных связей величина мощности помех линейного тракта не тракта превышает 40 000 пВтп, то необходимо применять компандеры.

[6] За исключением экстремальных неблагоприятных климатических условий.

[7] Желательная величина 500 пВтп. Предельно допустимая величина для одной цепи

* Рекомендация не окончательная.

В табл. 4.3.2 приведены нормы помех для оборонных систем связи (DCS), заданные в документе DCA 330-175-1 (прежний документ DCA 175-2A). Документ DCA дает совершенно другое оп-

Продолжение табл. 4.3.1

6	7	8					9	10
		3 L пВтп	(3L+200) пВтп	(3L+ +400) пВтп	(3L+ +600) пВтп		25 000 пВтп	
		$\frac{L}{2500}\times 0{,}1$	$\frac{280}{2500}\times 0{,}1$	$\frac{L}{2500}\times 0{,}1$	$\frac{L}{2500}\times 0{,}1$	$\frac{L}{2500}\times 0{,}1$	0,5	
							0,05	

ке с нулевым измерительным уровнем передачи на приемном конце рассматриваемой систе-
влиянием источников питания (силовой сети), не должна превышать 1 мВ на линейных за-
родным трактом центральной национальной телефонной станции, не должна быть более
более 100 000 пВт.
Рекомендациях МККТТ G143, G153, G222 и G442.
ко в отношении величины средней за час мощности помех.

тяженность, то требования к величине мощности помех линейного тракта определяются пу-

должна превышать 3 пВтп/км; если на реальной цепи общая мощность помех линейного

2000 пВтп.

ределение среднечасовой мощности помех, чем МККТТ и МККР. Эти определения даны в примечаниях 1 и 2 к табл. 4.3.2.

Таблица 4.3.2. **Требования к характеристикам помех, заданные DCA в Документе 330-175-1**

Типы систем			Тропосферные РРЛ			РРЛ прямой видимости на УКВ			Проводные системы	Системы уплотнения воздушных линий	Системы уплотнения симметричных кабелей	Системы уплотнения коаксиальных кабелей
Рассматриваемые телефонные цепи			ЭГЦ из нескольких пролетов общей длиной 6000 мор. миль	Реальная линия, один пролет длиной менее 1000 мор. миль	Реальная линия из нескольких пролетов от 1000 до 6000 мор. миль	ЭГЦ из нескольких пролетов с общей длиной 6000 мор. миль	Реальная однопролетная линия до 1000 мор. миль	Реальная линия из нескольких пролетов от 1000 до 6000 мор. миль	ЭГЦ из 6 последовательно включенных линий, 6000 мор. миль	ЭГЦ 12-канальной системы 1000 мор. миль	ЭГЦ 12—60-канальных систем, длина 1000 мор. миль	Реальные системы на 960, 1260 и 2700 каналов ТЧ
Псофометрическая мощность	Величина средней за час мощности помех[1,2]	Общая мощность помех	25 000 пВтп			25 000 пВтп			25 000 пВтп	14 800 пВтп	7400 пВтп	
		Мощность помех, вносимых преобразовательным оборудованием	5000 пВтп			5000 пВтп				2500 пВтп	2500 пВтп	
		Мощность помех линейного тракта	20 000 пВтп или $3.33L$ пВтп	$3{,}33L$ пВтп	$3{,}33L$ пВтп	20 000 пВтп или $3{,}33L$ пВтп	$3{,}33L$ пВтп	$3{,}33L$ пВтп		12 300 пВтп	4900 пВтп	$3\ L$ пВтп
	Процент времени, в течение которого может быть превышена мощность 316 000 пВтп[1,2]		0,1% или $\frac{L}{6000}\times 0{,}1\%$	$\frac{L}{1000}\times 0{,}02\%$	$\frac{L}{6000}\times 0{,}1\%$	0,01% или $\frac{L}{6000}\times 0{,}01\%$	$\frac{L}{1000}\times 0{,}002\%$	$\frac{L}{6000}\times 0{,}01\%$	0,01%			

[1] Для тропосферных РРЛ за величину средней за час мощности помех принимается среднее значение среднечасовых величин мощностей помех, рассчитанное для отрезка времени, получившего название «временной интервал 2». «Временной интервал 2» — 13.00—18.00 час. местного времени в период с ноября по апрель. Процент времени, в течение которого превышается мощность помех 316 000 пВтп, также должен определяться для «временного интервала 2».

[2] Для РРЛ прямой видимости величина средней за час мощности помех должна определяться в ЧНН в течение месяца с самыми неблагоприятными условиями передачи УКВ. Процент времени превышения заданной величины мощности помех определяется по среднеминутным значениям мощности помех в течение месяца наибольшей нагрузки.

4.4.
Требования к помехам преобразовательного оборудования

В таблицах гл. 4 даны требования к среднечасовым значениям мощности помех оконечного оборудования. Как МККТТ, так и DCA определяют мощность помех для различных ступеней преобразования следующим образом.

	МККТТ Допустимая мощность на модем, пВтп	DCA Допустимая мощность на модем, пВтп
Канал ТЧ	200—400	345
Первичная группа	60—100	70
Вторичная группа	60—100	60
Третичная группа	40—60	—
Четверичная группа	40—60	—
Объединение пятнадцати вторичных групп	40—60	—

На индивидуальное преобразовательное оборудование отводится большая часть мощности помех, поскольку количество этого оборудования на сети наибольшее. Благодаря этому преобразователи каналопреобразующего оборудования могут быть весьма дешевыми.

Глава 5 Загрузка многоканальным сигналом

5.1.
Источники помех в телефонной системе

В предыдущей главе рассмотрены требования к помехам в многоканальных телефонных системах. Существует много источников помех. Однако большинство помех имеет либо термическое происхождение, либо вызвано переходным разговором или взаимной модуляцией. Тепловой шум[25] возникает в каждой точке системы. Собственные помехи могут оказаться весьма значительными, например в радиосистемах возрастают при наличии замираний сигнала в результате действия АРУ приемника. Однако уровень этих помех не зависит от уровня загрузки линейного тракта. Помехи от переходного разговора, возрастающие при недостаточной фильтрации в преобразовательном оборудовании, могут быть уменьшены при помощи ограничивающих фильтров с большой крутизной, в которых обычно применяют кварцевые резонаторы или другие подобные элементы.

[25] Поскольку рассматриваемые помехи возникают не только вследствие броуновского движения молекул (т. е. не только от тепловых явлений), но и из-за вторичной эмиссии носителей зарядов и других флуктуационных причин, в дальнейшем изложении вместо термина «тепловой шум» (termal noise) используем принятый в отечественной практике термин «собственные помехи».

В многоканальных системах, где сигналы всех каналов ТЧ «обрабатываются» одними и теми же усилителями и другими общими элементами, любая нелинейность приводит к взаимной модуляции составляющих широкополосного сигнала. Искажения такого рода, попадающие в канал, обычно не связаны с сигналом в этом канале и представляют собой невнятную случайную помеху. Чтобы мощность таких помех была достаточно малой, необходимо учитывать распределение амплитуд как сигналов одиночных каналов, так и многоканального сигнала. Только учитывая это распределение, конструктор может быть уверенным в том, что разработанное им оборудование будет иметь достаточную, но не избыточную линейность.

5.2. Одноканальный и многоканальный пик-фактор

Были проведены детальные исследования распределения амплитуд в отдельных каналах ТЧ при телефонном сигнале и в линейных трактах многоканальных систем. Самым ранним и, вероятно, наиболее важным было исследование Хольбрука и Диксона — сотрудников «Bell Laboratories», проведенное в 1939 г. (см. библиографию). Некоторые цифры, приведенные в данном разделе, взяты из их работы.

Усилитель НЧ в каналопреобразующем оборудовании должен «обрабатывать» сигнал одного канала при максимальной ожидаемой громкости. Последняя зависит не только от отношения пиковой мощности сигнала к среднеквадратичной (пик-фактора) для данного «говорящего», но также от разницы уровней средней мощности сигналов «говорящих». Это учитывается при определении среднего уровня мощности сигнала на канал при расчетах загрузки (см. § 5.4) многоканальной системы.

Однако пик-фактор многоканального сигнала определить более сложно. Он зависит не только от пик-фактора сигнала в каждом канале, но и от числа активных каналов, поскольку все каналы редко бывают загружены максимально в одно и то же время.

На рис. 5.2.1 показано распределение вероятностей превышения мгновенного напряжения для 1, 4, 16 и 64 активных каналов ТЧ при телефонном сигнале в зависимости от отношения мгновенного напряжения к среднеквадратичному. Как и следовало ожидать, сигнал имеет больший пик-фактор при меньшем числе каналов. Для сравнения показано нормальное (гауссово) распределение амплитуд. Видно, что распределение для 64 каналов очень близко к гауссову.

Рисунок 5.2.2 получен из рис. 5.2.1 для двух значений вероятности, эквивалентных 99 и 99,9% времени. Из рисунка видно, например, что для одного канала в течение 1% времени пик-фактор превышает 13 дБ, а в течение 0,1% времени — 18,5 дБ. Для 100 каналов эти пик-факторы уменьшаются соответственно до

8,5 и 10,6 дБ. Следует также отметить, что при числе каналов около 80 и более пик-факторы отличаются от гауссова распределения не более чем на 0,5 дБ. Отсюда ясно, что нет необходимо-

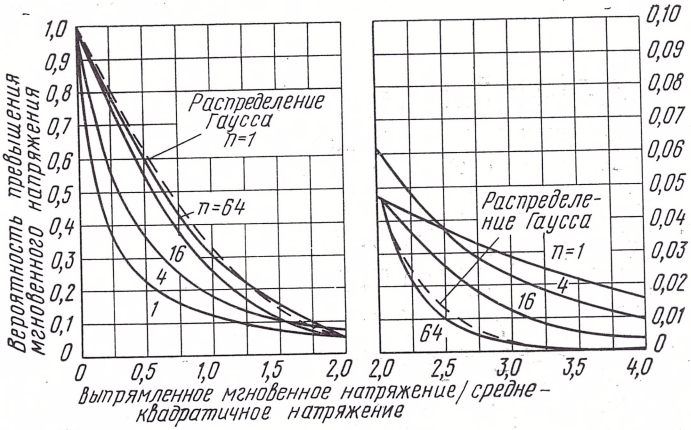


Рис. 5.2.1. Распределение вероятностей превышения мгновенного напряжения для n абонентов

сти разрабатывать многоканальное оборудование с учетом того же пик-фактора, как и для индивидуального оборудования каналов.

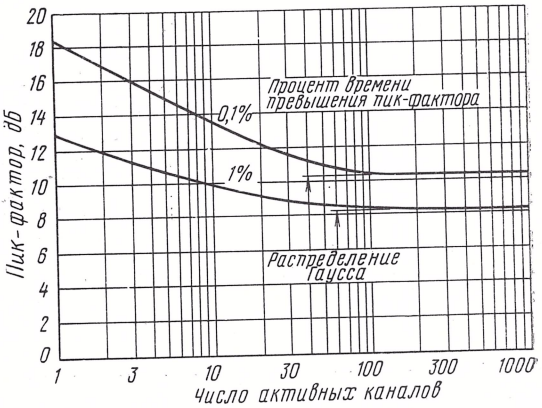


Рис. 5.2.2. Зависимость пик-фактора от числа активных каналов

5.3. Коэффициенты активности многоканальных систем

В предыдущем параграфе была показана зависимость пик-фактора от числа активных каналов ТЧ. Канал ТЧ является активным только в течение времени фактической передачи речевого сигна-

ла, а также во время коротких пауз между словами и слогами обычной связной речи. Канал неактивен в течение большей части времени установления соединения, во время пауз в разговоре и во время разговора другого абонента. Различными администра-

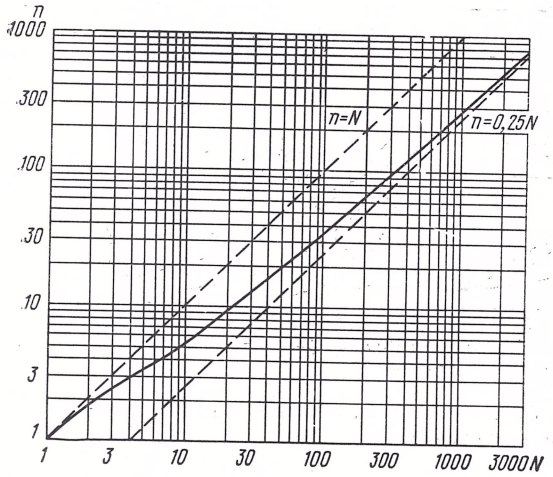


Рис. 5.3.1. Зависимость числа активных каналов от емкости системы (коэффициент активности одного телефонного канала равен 0,25):
n — число активных каналов, превышаемое в течение 1% времени; *N* — номинальная емкость системы (общее число каналов)

циями были проведены измерения в больших группах цепей, на основании которых повсеместно принят коэффициент активности одного канала ТЧ 25%. В больших группах каналов это значение

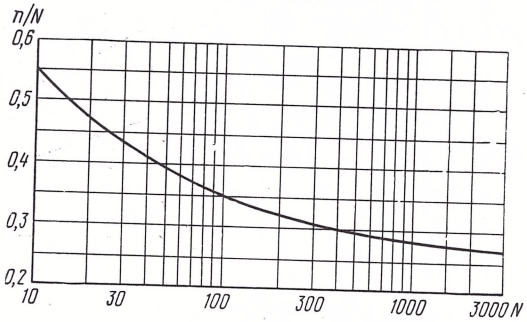


Рис. 5.3.2. Зависимость коэффициента активности от емкости системы

коэффициента превышается редко даже в течение часа наибольшей нагрузки (ЧНН). В небольших группах каналов коэффициент активности может быть заметно меньше.

Таким образом, при разработке многоканального оборудования должно быть принято во внимание максимальное число «вероятно» активных каналов в линейном тракте. Очевидно, если один канал активен в среднем в течение 25% времени, следует ожидать, что процент времени, в течение которого все каналы многоканальной системы активны, очень низок. Общепринятый коэффициент активности превышается только в течение 1% часа

наибольшей нагрузки. Соотношение между номинальным числом каналов системы N и числом активных каналов n показано на рис. 5.3.1. Коэффициенты активности для различного числа каналов приведены в табл. 5.3.1 и изображены на графике рис. 5.3.2. Из рисунка видно, что при большом числе каналов коэффициент активности стремится к величине 0,27. Однако МККТТ рекомендует коэффициент активности 0,25; следует ожидать, что это значение превышается в течение немногим более 1% времени. Расчетные соотношения, на основании которых получены характеристики рис. 5.3.1 и данные табл. 5.3.1, приведены в приложении 2.

Таблица 5.3.1. **Коэффициенты активности каналов в многоканальных системах различной емкости (с вероятностью 99% в ЧНН)**

Общее число каналов в многоканальной системе N	Число активных каналов n	Коэффициент активности n/N	Общее число каналов в многоканальной системе N	Число активных каналов n	Коэффициент активности n/N
12	7	0,583	600	175	0,292
24	11	0,458	900	256	0,284
36	15	0,417	960	272	0,283
60	23	0,383	1200	335	0,279
120	41	0,342	1260	351	0,279
240	76	0,317	1800	493	0,274
300	93	0,310	2700	728	0,270

Зависимости пик-фактора от числа активных каналов и коэффициента активности от емкости системы представляют не только академический интерес. Предположим, например, что должен быть разработан 60-канальный промежуточный усилитель, линейность которого такова, что не вызывает искажений из-за взаимной модуляции при всех отклонениях амплитуды, кроме 0,1%, в течение всего времени, за исключением 1%. Проще всего было бы умножить среднеквадратичную мощность одного канала на 60 (т. е. прибавить к уровню этой мощности 17,8 дБ) и прибавить пик-фактор одного канала (18,5 дБ). При этом линейность усилителя должна была бы сохраняться до уровня, превышающего уровень среднеквадратичной мощности одного канала на 36,3 дБ. Однако из табл. 5.3.1 видно, что число активных каналов не превышает 23 (что соответствует увеличению уровня лишь на 13,6 дБ) в течение 99% времени. Из рис. 5.2.2 находим, что пик-фактор 23 активных каналов составляет 12,0 дБ для 99,9% времени. Таким образом, если промежуточный усилитель линеен до уровня, на 25,6 дБ превышающего уровень средней мощности одного канала, то такой усилитель будет создавать достаточно малые нелинейные искажения. Сравнение этих двух значений требуемой линейности показывает, что во втором случае оно снижено на 10,7 дБ. Таким образом, промежуточный усилитель, разработанный в соответствии с первым критерием, имел бы неоправданные запасы линейности, а следовательно, был бы не экономичным.

5.4. Уровень средней мощности многоканального сигнала в системах большой емкости

Общепринятый уровень средней мощности сигнала в одиночном канале ТЧ при телефонном разговоре составляет — 15 дБм0. Это значение является средним за час наибольшей нагрузки, а также средним для большой группы каналов, используемых для передачи речевых сигналов. Этот уровень был определен МККТТ, который рекомендовал его как «общепринятую» величину. В результате ряда измерений, выполненных различными администрациями для МККТТ, получено то же значение — 15 дБм0 — следующим образом:

Средняя мощность для сигнальных и контрольных частот, мкВт 10
Средняя мощность речевого сигнала (88 мкВт), умноженная на коэффициент активности 0,25, мкВт 22
Общая мощность сигналов на канал, мкВт . . . . . 32 (→—15 дБм0)

Коэффициент активности 0,25 рекомендуется МККТТ для систем с числом каналов от 240 и выше. Уровень средней мощности многоканального сигнала в линейном тракте, по которому передаются речевые сигналы, может быть определен следующим образом:

уровень средней мощности при передаче речевых сигналов =

$$= -15 + 10 \lg N \text{ дБм0} \qquad (1)$$

(для $N \geqslant 240$ в течение 99% часа наибольшей нагрузки).

Уже отмечалось, что при 80 или более активных каналах распределение амплитуд очень близко к гауссову. Следовательно, это относится также и к числу каналов от 240 и выше.

5.5. Уровень средней мощности многоканального сигнала в системах малой емкости

Как видно из табл. 5.3.1, в системах с малым числом каналов ($N < 240$) коэффициент активности увеличивается. Кривая отношения числа активных каналов n к номинальной емкости системы N (см. рис. 5.3.1) близко аппроксимируется следующим соотношением:

$$10 \lg n = 8 \lg N - 0{,}4 \quad (\text{для } 12 < N < 240). \qquad (2)$$

Из § 5.4 можно заключить, что уровень средней мощности сигнала в активном канале может быть принят равным —10 дБм0→ →98 мкВт. При этом уровень средней мощности многоканального сигнала при числе активных каналов n будет составлять

уровень средней мощности речевых сигналов =

$$= -10 + 10 \lg n \text{ дБм0}. \qquad (3)$$

Объединяя равенства (2) и (3), получаем

уровень средней мощности речевых сигналов =

$$= -10{,}4 + 8 \lg N \text{ дБм0} \qquad (4)$$

(для $12 < N < 240$ в течение 99% часа наибольшей нагрузки).

С уменьшением емкости системы пик-фактор многоканального сигнала все больше будет отличаться от гауссова (см. рис. 5.2.2).

На рис. 5.5.1 показана характеристика уровня средней мощности многоканального сигнала, полученная при объединении равенств (1) и (4), а также показано изменение уровня средней

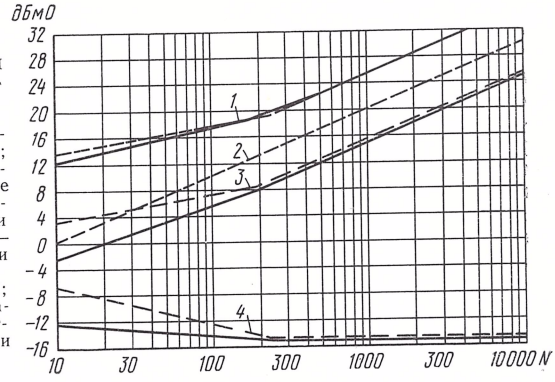


Рис. 5.5.1. Зависимость уровня мощности загрузки системы от ее номинальной емкости:

1 — уровень пиковой мощности, превышаемый в течение 0,1% времени; *2* — уровень средней мощности многоканального сигнала при передаче данных; *3* — уровень средней мощности многоканального сигнала при передаче телефонных сигналов; *4* — уровень средней мощности загрузки одного телефонного канала;
——— реальная загрузка в ЧНН;
— — — — уровень мощности загрузки сигналом шума в соответствии с рекомендациями МККТТ или MIL-STD-188C

мощности сигнала в канале от постоянного значения — 15 дБм0 при 240 каналах и выше до значения — 12,4 дБм0 при 12 каналах. Уровень пиковой мощности, превышаемый только в течение 0,1% времени, взят из рис. 5.2.2 и преобразован к номинальной емкости системы на рис. 5.3.1. В результате получена кривая уровней пиковой мощности, показанная на рис. 5.5.1. Кроме того, на рис. 5.5.1 показаны рекомендуемые уровни загрузки белым шумом, о котором будет говориться в § 6.1.

5.6. Уровень средней мощности многоканального сигнала при цифровой загрузке

Для систем, загруженных преимущественно цифровыми или телеграфными сигналами, обычно принимается коэффициент активности, равный 1. Например, согласно MIL-STD-188 C средняя мощность таких сигналов в канале принимается равной 100 мкВт при коэффициенте активности для цифровой информации, равном 1. При этом

уровень средней мощности сигналов цифровой информации =

$$= -10 + 10 \lg N \text{ дБм0}. \qquad (5)$$

Кривая, соответствующая ур-нию (5), также показана на рис. 5.5.1.

К § 5.4—5.6 необходимо сделать пояснения. Во-первых, уровень средней мощности сигнала в канале ТЧ является важной величиной, характеризующей пропускную способность той или иной ВЧ системы передачи (этим параметром пользуются ниже при оценке качества передачи информации по системе связи). Во-вторых, величина уровня мощности сигнала в канале определяется видом передаваемой по каналу информации. Даже для речевых сигналов абонентов, говорящих на различных языках, она заметно отличается от приведенной автором. Следовательно, уровень средней мощности сигналов в каналах ТЧ каждой конкретной ВЧ системы передачи должен определяться в зависимости от вида информации, передаваемой по системе, числа каналов, занимаемых информацией того или иного вида, уровней мощности контрольных частот и управляющих сигналов, длительности последних и т. д. В связи с этим в применяемых в Советском Союзе многоканальных системах связи уровень средней мощности сигналов в каналах ТЧ различен. Например, уровень средней мощности сигнала в канале ТЧ системы К-1920 составляет в ТНИУ $p_{к(0)}=-14{,}2$ дБм0 (→38 мкВт), в системе К-300 $p_{к(0)}=-14$ дБм0 (→40 мкВт), в системе VLT-1920 $p_{к(0)}=-13$ дБм0 (→50 мкВт). Загрузка систем сигналами различного вида должна осуществляться так, чтобы не превышалась расчетная величина уровня средней мощности на один канал ТЧ и распределение сигналов по спектру было возможно более равномерным.

Итак, в общем виде уровень средней мощности $p_{м(0)}$ (в дБм0) многоканального сигнала в точке с нулевым измерительным уровнем для систем с числом каналов N более 240 определяется выражением

$$p_{м(0)} = p_{к(0)} + 10 \lg N. \qquad (6)$$

Глава 6 Метод загрузки сигналом шума и измерительные приборы

6.1. Имитация многоканального сигнала белым шумом

В гл. 4 приводились требования к характеристикам помехозащищенности систем, предъявляемые различными организациями. Эти требования, очевидно, удобны для эксплуатационного персонала, поскольку приведенные данные могут быть легко пересчитаны в величину мощности эквивалентного шума в телефонном приемнике. Однако для точного определения свойств оборудования, а также для испытаний в процессе исследований, разработки, производства, настройки и профилактического ремонта они не удобны. Выше было показано, что значительная часть помех системы зависит от уровня загрузки (помехи взаимной модуляции). Таким образом, для убедительного доказательства нормального состояния оборудования необходимо имитировать загрузку.

Необходимы измерения, которые можно быстро осуществлять в точно контролируемых условиях и результаты которых можно сопоставить с требованиями по помехам.

Средняя мощность многоканального сигнала в многоканальной телефонной системе для различных условий была определена

в § 5.4, 5.5 и 5.6. Было показано, что при номинальной емкости системы от 240 каналов и выше амплитуды сигналов распределяются по закону Гаусса. Собственные помехи характеризуются двумя основными свойствами. Во-первых, они имеют однородный энергетический спектр, а во-вторых, их амплитуды также распределяются по закону Гаусса. Такие помехи часто называют белым шумом, так как их спектр аналогичен спектру белого света. Очевидно, эти два свойства позволяют применять белый шум в качестве удовлетворительной модели многоканального сигнала при числе каналов $N \geqslant 240$.

При имитации номинального уровня загрузки многоканального тракта мощность белого шума следует определять по ур-нию (1) § 5.4:

$$\text{уровень средней мощности белого шума} = -15 + 10 \lg N \text{ дБм0} \quad (\text{для } N \geqslant 240). \qquad (1)$$

Соотношение (1) справедливо в том случае, если уровень средней мощности сигналов в каналах ТЧ равен —15 дБм0 (т. е. →32 мкВт). Если в измеряемой системе уровень средней мощности сигнала в канале $p_{к(0)}$ в ТНИУ не совпадает с приведенным автором, то уровень средней мощности белого шума для систем с числом каналов $\geqslant 240$ должен определяться по соотношению (6) гл. 5.

Из рис. 5.5.1 видно, что ур-ние (1), приведенное выше, совпадает с ур-нием (1) § 5.4. Поскольку многоканальный сигнал также подчиняется гауссову распределению, кривые 0,1% пиковой мощности тоже фактически совпадают.

При числе каналов $N < 240$ многоканальный сигнал значительно отличается от сигналов с гауссовым распределением. В международной практике принято моделировать такие системы белым шумом, мощность которого рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{уровень средней мощности белого шума} = -1 + 4 \lg N \text{ дБм0} \quad (\text{для } 12 < N < 240). \qquad (2)$$

Уравнение (2) графически изображено на рис. 5.5.1. Можно видеть, что эта кривая отклоняется от средней мощности многоканального сигнала тем больше, чем меньше число каналов N. При числе каналов $N = 12$ это отклонение составляет 5 дБ. Однако показанная на этом же рисунке кривая уровней пиковой эквивалентной мощности белого шума (превышаемой не более чем в течение 0,1% времени), соответствующая уровням средней мощности белого шума, рассчитанным по ур-нию (2), очень близка к кривой, характеризующей соответствующие уровни пиковой мощности многоканального сигнала. Различие между этими кривыми не превышает 0,5 дБ при числе каналов более 60. Поскольку аппаратура не пропускает пиковые напряжения сигналов, превышающие заданные (эти напряжения ограничиваются и вызывают модуляционные искажения), то найденное практическое совпадение характеристик пиковых мощностей позволяет адекватно мо-

делировать белым шумом многоканальный сигнал для систем малой емкости.

Уравнения (1)[26] и (2) этого раздела позволяют определить номинальные уровни загрузки белым шумом, которые согласованы международными организациями и приведены, например, в материалах МККР, МККТТ, DCA, MIL-STD и INTELSAT. Подробное описание рекомендаций по шумовой загрузке этих международных организаций приведено в гл. 8.

Широко практикуется также использование белого шума для моделирования многоканального сигнала при загрузке цифровой или телеграфной информацией. Например, в документе MIL-STD-188C в соответствии с ур-нием (5) § 5.6 приведена следующая формула для расчета номинальной шумовой загрузки:

$$\text{уровень средней мощности белого шума} = -10 + 10 \lg N \text{ дБм0} \quad (3)$$

(цифровая загрузка при $N > 12$).

6.2. Полоса частот белого шума

Белый шум с уровнями мощности, определенными из ур-ний (1), (2) и (3) § 6.1, а также (6) гл. 5, является правильной моделью номинального уровня загрузки только в том случае, если полоса частот белого шума ограничена так же, как полоса частот системы. В гл. 2 приведены спектры основных трактов систем передачи. Обычно спектр шума ограничивают, пропуская сигнал от генератора через последовательно включенные фильтры нижних и верхних частот. Характеристики этих фильтров и их номинальные частоты среза указаны в рекомендациях различных организаций (см. гл. 8).

6.3. Измерение нелинейных и собственных помех

Загрузив тракт белым шумом, имитирующим обычный многоканальный сигнал, необходимо измерить результирующие помехи. Такие измерения заключаются в основном в поочередном включении ряда полосно-заграждающих фильтров, средние частоты которых расположены в пределах ограниченного спектра белого шума. Эти фильтры создают на входе системы «тихие» каналы[27] или «щели», которые при прохождении сигнала белого шума через систему «загрязняются» собственными помехами и продуктами нелинейных искажений.

На выходе системы при помощи узкополосного приемника белого шума, настроенного на частоту полосно-заграждающего

[26] Для отечественной практики см. выражение (6) из гл. 5.
[27] Назовем их далее «измерительными каналами».

фильтра, измеряются помехи и продукты нелинейных искажений в идеально «чистой» щели. Частоты измерительных каналов и характеристики полосно-заграждающих фильтров являются предметом рассмотрений Международных комиссий и приведены в рекомендациях (см. гл. 8).

6.4. Помехозащищенность

При измерениях с загрузкой белым шумом наиболее часто пользуются понятием «помехозащищенность» (noise power ratio, n. p. r), которое определяется следующим образом:

«Помехозащищенность — это логарифмическое отношение мощности шума в измерительном канале при полной загрузке бе-

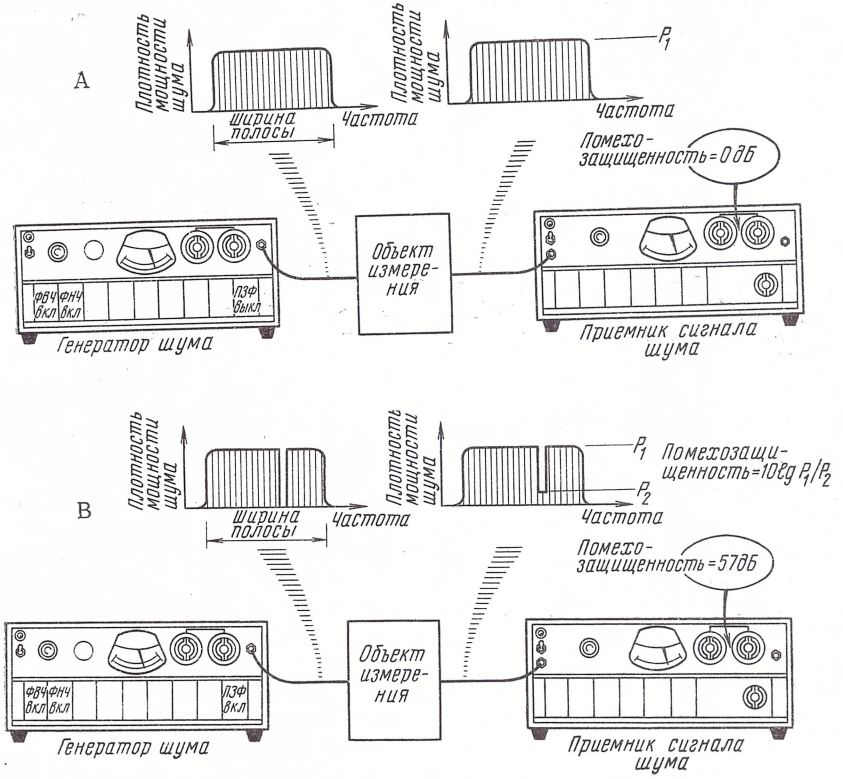


Рис. 6.4.1. Измерение помехозащищенности при загрузке белым шумом. Фильтры ФНЧ и ФВЧ выбираются таким образом, чтобы спектр сигнала шума соответствовал диапазону частот объекта измерений. В режиме «А» регулировкой приемника сигнала шума стрелки индикатора приемника устанавливается на отметку шкалы 0 дБ. В режиме «В» включается ПЗФ выбранного измерительного канала и регулировкой входного аттенюатора приемника сигнала шума стрелка индикатора вновь устанавливается на отметку шкалы 0 дБ. Разность показаний аттенюатора в режимах «А» и «В» равна измеряемой помехозащищенности

лым шумом измеряемого тракта к мощности помех в этом канале при загрузке белым шумом всего тракта, за исключением измерительного канала».

Описанный выше метод измерения иллюстрируется рис. 6.4.1, на котором фильтры верхних частот, нижних частот и полосно-заграждающий обозначены соответственно ФВЧ, ФНЧ и ПЗФ.

6.5. Описание типичной установки для измерений при загрузке трактов белым шумом

Установка для измерения с загрузкой белым шумом состоит из двух частей: генератора шума и приемника.

Структурная схема типичного генератора шума показана на рис. 6.5.1. Сигнал белого шума после усиления проходит через фильтры верхних и нижних частот для ограничения его спектра в

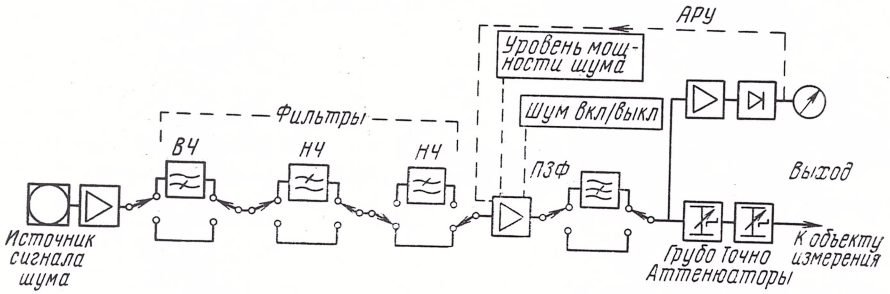


Рис. 6.5.1. Структурная схема типичного передатчика сигнала белого шума

заданных пределах. После дополнительного усиления сигнал проходит к выходному аттенюатору через ряд полосно-заграждающих фильтров, которые могут быть по отдельности либо включены, либо выключены. При помощи аттенюатора, а также измерителя мощности устанавливается необходимый уровень мощности загрузки измеряемого тракта. Для компенсации потерь при включении полосно-заграждающего фильтра применена автоматическая регулировка уровня (влияние АРУ показано в § 9.7). Назначение показанного на рисунке выключателя шумового сигнала пояснено в § 6.6.

Структурная схема типичного приемника изображена на рис. 6.5.2. С выхода измеряемой системы сигнал проходит через входной аттенюатор к одному из полосно-пропускающих фильтров. Средняя частота включенного полосно-пропускающего фильтра совпадает со средней частотой включенного в генераторе шума полосно-заграждающего фильтра, а ширина полосы пропускания несколько уже ширины полосы задерживания. Полосно-пропу-

скающий фильтр уменьшает нелинейные искажения в смесителе приемника и тем самым уменьшает ошибку измерений.

При помощи гетеродинов, которые переключаются в соответствии с выбранным измерительным каналом, сигнал переносится в область промежуточных частот для усиления и измерения.

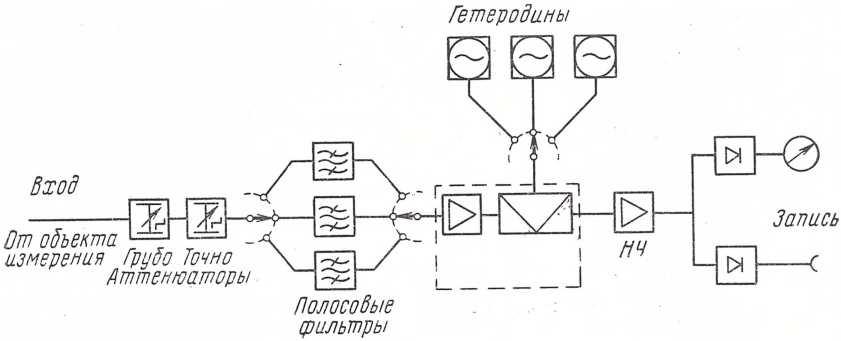


Рис. 6.5.2. Структурная схема типичного приемника сигнала белого шума

Во время измерений помехозащищенности затухание аттенюатора регулируется таким образом, чтобы не менялись показания индикатора при включенном и выключенном полосно-заграждающем фильтре. При этом значение помехозащищенности отсчитывается непосредственно по изменению затухания аттенюатора.

6.6. Измерение собственных помех и защищенность тракта от собственных помех

В § 5.1 показано отличие собственных помех, уровень мощности которых не является функцией уровня загрузки, от нелинейных помех, вызываемых нелинейностью системы. При отключении шумового генератора от тракта нелинейные искажения исчезают, а собственные помехи сохраняются. Таким образом, применение выключателя шума (см. рис. 6.5.1) облегчает измерение собственных помех.

При определении собственных помех иногда пользуются понятием защищенности тракта от собственных помех. Под этим термином имеется в виду следующее:

«Защищенность тракта от собственных помех представляет собой логарифмическое отношение мощности помех в измеряемом канале при полностью загруженном тракте (полосно-заграждающий фильтр выключен) к мощности помех в измеряемом канале при отключении шумовой загрузки от тракта».

Таким образом, по разности между помехозащищенностью и защищенностью от собственных помех можно определить величину помех от нелинейных искажений и переходного разговора в системе.

6.7.
Отношение сигнал/помеха

Представление помех в измеряемом канале в виде помехозащищенности позволяет получить относительную меру помех. Можно также выражать помехи в децибелах относительно заданного абсолютного уровня сигнала в измеряемом канале. Определение термина отношение сигнал/помеха:

«Отношение сигнал/помеха представляет собой логарифмическое отношение мощности нормального измерительного сигнала (0 дБм0) к мощности помех в полосе измеряемого канала, шириной 3100 Гц».

Таким образом, отношение сигнал/помеха численно равно уровню мощности помех в канале, выраженной в дБм0 с обратным знаком. Например, уровень мощности помех —44 дБм0/канал соответствует отношению сигнал/помеха 44 дБ.

Следовательно, отношение сигнал/помеха $= -p_{\text{пом}}$ дБм0.

6.8.
Другие абсолютные единицы

Помехи могут выражаться целым рядом других единиц измерения, из которых наиболее употребительными являются пВт0п/канал, dBrnC0 и dBa0 (F1A). Об этих единицах говорилось в гл. 3. Эти единицы подобны отношению сигнал/помеха, но исходные уровни для них другие: 1 пВт для пВт0п/канал и dBrnC0 и 3,16 пВт для dBa0 (F1A). Кроме того, эти единицы взвешенные, в то время как отношение сигнал/помеха обычно не взвешено.

Поскольку отношение сигнал/помеха представляет собой величину, обратную по знаку уровню мощности в дБм0, можем найти его связь с dBrnC0 и dBa0 (F1A). В соответствии с § 3.9

$$p\,[\text{dBa0 (F1A)}] = p\,(\text{дБм0}) + 82 \text{ дБ}.$$

Таким образом,

$$\text{dBa0 (F1A)} \rightarrow 82 - \text{сигнал/помеха}. \qquad (4)$$

Аналогично из § 3.10 dBrnC0→88,5 — сигнал/помеха.

Общепринято округлять эту величину на 0,5 дБ. При этом получаем

$$\text{dBrnC0} \rightarrow 88 - \text{сигнал/помеха}. \qquad (5)$$

Связь между отношением сигнал/помеха и пВт0п может быть получена на основе § 3.1 и 3.3, поскольку

$$\text{пВт0п} \rightarrow 0{,}56 \text{ пВт0} = 0{,}56 \cdot 10^{\lg \frac{90+p\,(\text{дБм0})}{10}}$$

и

$$P\,(\text{пВт0п}) = \frac{0{,}56 \cdot 10^9}{10^{\lg\,(\text{сигнал/помеха})}}.$$

6.9. Зависимость между помехозащищенностью и отношением сигнал/помеха

Вывод соотношения между помехозащищенностью и отношением сигнал/помеха приведен в приложении 3. Ниже приведены конечные соотношения, в которых Δf — ширина полосы частот (кГц) тракта с номинальной емкостью N каналов ТЧ и уровнем мощности загрузки $p_{м(0)}$ (дБм0):

невзвешенное отношение сигнал/помеха = помехозащищенность $+ 10 \lg \frac{\Delta f}{3,1} - p_{м(0)}$ дБ; (6)

взвешенное отношение сигнал/помеха = помехозащищенность $+ 10 \lg \frac{\Delta f}{3,1} - p_{м\,(0)} + W$ дБ, (7)

где W — взвешивающий коэффициент в дБ.

Поскольку $p_{м(0)} = -15 + 10 \lg N$ для $N \geqslant 240$ и $p_{м(0)} = -1 + 4 \lg N$ для $N < 240$, выражения (6) и (7) с точностью около 0,2 дБ могут быть записаны следующим образом. Для $N < 240$ каналов:

отношение сигнал/помеха (невзвешенное) = помехозащищенность $+ 6 \lg N + 2,1$ дБ; (8)

отношение сигнал/помеха (псофометрическое) = помехозащищенность $+ 6 \lg N + 4,6$ дБ; (9)

отношение сигнал/помеха (С-контур) = помехозащищенность $+ 6 \lg N + 3,6$ дБ; (10)

отношение сигнал/помеха (F1A) = помехозащищенность $+ 6 \lg N + 5,1$ дБ. (11)

Для $N \geqslant 240$ каналов:

отношение сигнал/помеха (невзвешенное) = помехозащищенность + 16,3 дБ; (12)

отношение сигнал/помеха (псофометрическое) = помехозащищенность + 18,8 дБ; (13)

отношение сигнал/помеха (С-контур) = помехозащищенность + 17,8 дБ; (14)

отношение сигнал/помеха (F1A) = помехозащищенность + 19,3 дБ. (15)

С учетом отмеченного выше отличия $p_{к(0)}$ в отечественных системах от —15 дБм0 в ф-лы (12)—(15) следует внести поправку δp, которая равна:

$\delta p = -0,8$ дБ при $p_{(к0)} = -14,2$ дБм0 (38 мкВт/канал);

$\delta p = -1$ дБ при $p_{к(0)} = -14,0$ дБм0 (40 мкВт/канал);

$\delta p = -2$ дБ при $p_{к(0)} = -13,0$ дБм0 (50 мкВт/канал).

Аналогичные поправки должны быть учтены при использовании в отечественной практике данных приведенной ниже табл. 6.9.1.

Таблица 6.9.1. **Номинальный уровень мощности загрузки и соотношения между помехозащищенностью и отношением сигнал/помеха при номинальной загрузке систем**

Число каналов ТЧ в системе N	Логарифм отношения полосы частот линейного тракта системы к полосе канала ТЧ $10\lg\left(\frac{\Delta f}{3{,}1}\right)$, дБ	Уровень номинальной мощности загрузки $-1+41\lg N$ ($N<240$), $-15+10\lg N$ ($N\geqslant 240$), дБм0	Разность между помехозащищенностью и отношением сигнал/помеха, дБ	Число каналов ТЧ в системе N	Логарифм отношения полосы частот линейного тракта системы к полосе канала ТЧ $10\lg\left(\frac{\Delta f}{3{,}1}\right)$, дБ	Уровень номинальной мощности загрузки $-1+41\lg N_j$ ($N<240$), $-15+10\lg N$ ($N\geqslant 240$), дБм0	Разность между помехозащищенностью и отношением сигнал/помеха, дБ
12	11,9	3,3	8,6	432	27,6	11,4	16,2
24	14,9	4,5	10,4	600	29,1	12,8	16,3
36	16,7	5,2	11,5	612	29,2	12,9	16,3
48	17,9	5,7	12,2	792	30,2	14,0	16,2
60	18,9	6,1	12,8	900	30,8	14,5	16,3
72	19,7	6,4	13,3	960	31,1	14,8	16,3
120	22,0	7,3	14,7	972	31,2	14,9	16,3
132	22,4	7,5	14,9	1200	32,3	15,8	16,5
192	24,1	8,1	16,0	1260	32,5	16,0	16,5
240	25,1	8,8	16,3	1800	34,0	17,5	16,5
252	25,3	9,0	16,3	1872	34,2	17,7	16,5
300	26,0	9,8	16,2	2700	35,9	19,3	16,5

В табл. 6.9.1 приведены логарифмы отношения полос систем к полосе частот канала ТЧ, номинальные загрузки и коэффициенты пересчета помехозащищенности в отношение сигнал/помеха для систем различной емкости. Сравнение этих коэффициентов пересчета при числе каналов $N\geqslant 240$ с приведенным выше ур-нием (12) подтверждает хорошую степень приближения, обеспечиваемую этим уравнением.

Значение помехозащищенности может быть пересчитано в dBa 0 (F1A) или dBrn C0 с помощью ур-ний (4) или (5) § 6.8 и с учетом приведенного в табл. 6.9.1 соотношения между помехозащищенностью и отношением сигнал/помеха при номинальной мощности загрузки системы. Например, при номинальной загрузке для $N\geqslant 240$ каналов ТЧ с точностью 0,2 дБ можно записать:

$$p\,[\text{dBa0 (F1A)}] = 65{,}7 - \text{помехозащищенность;} \qquad (16)$$

$$p\,(\text{dB rn C0}) = 71{,}7 - \text{помехозащищенность.} \qquad (17)$$

Если уровень мощности загрузки отличается от номинального, то приведенные в табл. 6.9.1 величины разностей между помехозащищенностью и отношением сигнал/помеха должны быть уменьшены на величину Δp, равную разности в децибелах между фактическим и номинальным уровнями мощности загрузки. Аналогичная поправка должна быть введена в ур-ния (6)—(17). Величина разности между помехозащищенностью и отношением сигнал/помеха при уровне мощности загрузки ($p_{\text{м(0)}} + \Delta p$) дБм0 равна разности между помехозащищенностью и отношением сигнал/помеха

при уровне мощности загрузки $p_{м(0)}$ дБм0 минус Δp дБ. Например, разность между помехозащищенностью и отношением сигнал/помеха для $N \geqslant 240$ и при уровне мощности загрузки на 6 дБ выше номинальной ($\Delta p = 6$ дБ) составит 16,3 дБ — 6 дБ, т. е. 10,3 дБ.

Глава 7 Измерение трактов и оборудования при их загрузке белым шумом

7.1. Типичная кривая помехозащищенности

Определение помехозащищенности дано в § 6.3, а ее связь с отношением сигнал/помеха — в § 6.9. До сих пор предполагалось, что измерение помехозащищенности системы осуществляется только при номинальном уровне мощности загрузки. На самом деле представляет интерес измерение помехозащищенности системы в пределах некоторого диапазона уровней мощности загрузки. Обычно измеряют помехозащищенность, изменяя уровень мощности загрузки ступенями по 1 или 2 дБ в пределах, по крайней мере, на 10 дБ ниже и, по крайней мере, на 6 дБ выше номинального уровня. При этом значения помехозащищенности наносят на график в виде функции от уровня мощности загрузки и получают «кривую помехозащищенности». Кривые помехозащищенности вычерчиваются для ряда измерительных каналов. Эти каналы должны быть расположены в начале, середине и конце частотного спектра измеряемого тракта. Таким образом должно быть измерено, по крайней мере, три канала, а по возможности до пяти и более каналов в зависимости от емкости системы и степени соответствия рекомендациям (см. гл. 8).

На рис. 7.1.1 показана типичная кривая помехозащищенности, измеренная в верхнем канале линейного тракта 960-канальной радиорелейной системы. Эта кривая получена путем измерений в достаточно широком диапазоне уровней — в пределах ±15 дБ относительно номинального уровня мощности загрузки 14,8 дБм0. Очевидно, что при малом уровне мощности загрузки система линейна и с увеличением уровня на 1 дБ значение помехозащищенности увеличивается на 1 дБ. При этом нелинейные помехи отсутствуют, а единственным источником помех являются собственные помехи измерительного канала. При дальнейшем повышении уровня мощности загрузки помехозащищенность увеличивается медленнее, чем уровень шумового сигнала на входе тракта, что объясняется появлением дополнительных помех, вызванных нелинейностью системы. Когда загрузка становится избыточной, нелинейные помехи начинают преобладать над собственными, а помехозащищенность уменьшается. И, наконец, при условии значительного

превышения уровня мощности над номинальным, помехозащищенность уменьшается по линейному закону.

Эквивалентная «кривая отношения сигнал/помеха» показана на рис. 7.1.2, где имеется также шкала в dBa0 (F1A). На этой кривой особенно хорошо видна линейная (собственные помехи) область, которая представлена здесь горизонтальной частью кривой. На кривой отношения сигнал/помеха не так четко, как на

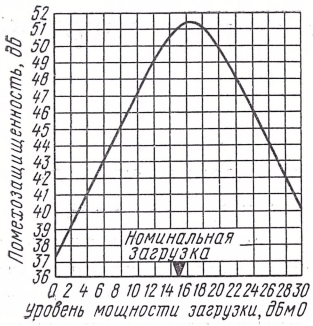


Рис. 7.1.1. Кривая помехозащищенности радиорелейной системы емкостью 960 каналов ТЧ (измерительный канал со средней частотой 3886 кГц)

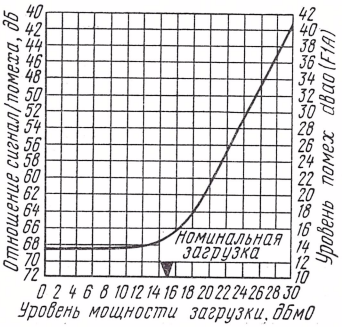


Рис. 7.1.2. Кривая отношения сигнал/помеха, эквивалентная кривой помехозащищенности, изображенной на рис. 7.1.1

кривой помехозащищенности, видна точка, с которой начинают преобладать нелинейные искажения. Количественный анализ кривых помехозащищенности и отношения сигнал/помеха приведен в § 9.1 и 9.2.

7.2. Измерения линейных трактов

Наиболее часто измерения с шумовой загрузкой осуществляются от входа до выхода линейного тракта. В процессе исследований, разработки или выпуска оконечное оборудование кабельных систем может быть проверено путем соединения «на себя». Передатчик радиосистемы может быть соединен с приемником по высокой или промежуточной частоте.

При сдаче в эксплуатацию или техническом обслуживании системы, работающей между двумя пунктами *A* и *B*, применяются два метода измерения трактов. Первый из них предполагает наличие измерительной установки на обоих концах системы. Измерения в направлении от *A* к *B* проверяются при помощи передатчика, установленного в пункте *A*, и приемника, установленного в пункте *B*; измерения в обратном направлении — при помощи передатчика в пункте *B* и приемника в пункте *A*. В этих испытаниях участвуют два оператора, имеющие связь между пунктами *A* и *B* по «служебным цепям» или каналам, которые не проходят по тракту испытуемой системы. Заметим, что при таком методе изме-

рений характеристики системы определяются отдельно для каждого направления передачи.

При втором методе, известном под названием метод «шлейфа», используется одна установка для загрузки белым шумом; измерения выполняет один оператор. Выход тракта в точке *B* соединяется со входом тракта обратного направления, т. е. шлейфом. В радиосистемах такое соединение может быть осуществлено также по промежуточной частоте. При этом общие характеристики системы для направлений *A*—*B* и *B*—*A* измеряются при помощи шумового передатчика и приемника в точке *A*. Таких измерений обычно достаточно при сдаче системы в эксплуатацию, поскольку, если параметры системы, соединенной шлейфом, соответствуют требованиям, можно ожидать, что требованиям соответствуют и характеристики каждого направления передачи. Однако при определении мест повреждений в процессе эксплуатации, очевидно, следует предпочесть раздельное измерение характеристик двух направлений передачи. Измерения шлейфом могут также использоваться для проверки оборудования на каждой стороне. Для радиосистем шлейф может создаваться по промежуточной или радиочастоте. При этом для преобразования частотного спектра передачи в частотный спектр приема необходимо пользоваться шлейфовым смесителем и генератором сдвига.

7.3. Преобразовательное оборудование линейного тракта (оборудование сопряжения)

В современных подводных кабельных системах передача в обоих направлениях осуществляется по одному кабелю, причем для передачи в направлении от *B* к *A* используется высокочастотная полоса, а для передачи направлений от *A* к *B* — низкочастотная полоса (см. § 1.6)[28]. При испытаниях такой системы белый шум одновременно передается от пункта *B* в высокочастотной полосе и от пункта *A* в низкочастотной полосе.

На входы тракта в обоих оконечных пунктах подается белый шум с низкочастотным спектром, который переносится в высокочастотный спектр направления *B*—*A* в пункте *B*, а затем в низкочастотный спектр в пункте *A*. Сигнал белого шума направления *A*—*B* проходит обе оконечные станции без преобразования. Таким образом, оконечные станции и линейный тракт испытываются путем передачи белого шума в низкочастотной полосе одновременно в обоих направлениях, причем в пункте *B* шумовой сигнал предварительно переносится в высокочастотный спектр. Таким же образом проверяются оконечные станции при соединении их шлейфом до установки.

[28] Аналогично формируется спектр двухполосных систем и при прокладке кабеля в земле, например в отечественной системе К-120.

Для того чтобы отдельно проверить помехозащищенность оборудования направления *B—A* на оконечной станции *B*, необходимо иметь возможность организовать нестандартные шумовые измерительные каналы. С этой целью в шумовой приемник дополнительно включаются полосно-пропускающие фильтры и гетеродины с частотами в высокочастотном спектре, эквивалентными частотам полосно-заграждающих фильтров в низкочастотном спектре. Для аналогичных измерений в пункте *A* в шумовой передатчик добавляются полосно-заграждающие фильтры с частотами в высокочастотном спектре, эквивалентными частотам каналов шумового приемника в низкочастотном спектре. Это дает возможность измерить помехозащищенность оборудования направления *B—A* на оконечной станции *A*. Поскольку в направлении *A—B* никаких преобразований частоты не требуется, то измерения оборудования этого направления передачи осуществляются обычными методами.

7.4. Преобразовательное оборудование групповых трактов

Метод измерений при загрузке белым шумом наиболее часто применяется для оценки качества передачи информации по линейному тракту. При этом используются стандартные способы и специальные устройства, описанные в § 7.2 и 7.3. Однако аналогично может быть испытано и преобразовательное оборудование. При этом для шлейфовых измерений все входы преобразовательного оборудования должны быть загружены некоррелированным белым шумом, т. е. необходимо применять несколько генераторов шума.

Например, для проверки преобразовательного оборудования первичных групп к пяти различным входам подключаются пять генераторов шума с полосами частот от 60 до 108 кГц. Выход тракта передачи вторичной группы подключается ко входу тракта приема, после чего помехозащищенность каждой первичной группы оценивается при помощи шумового приемника. Для оценки оборудования преобразования вторичных групп также требуются пять генераторов шума, а для измерения оборудования преобразования третичных групп — три генератора шума.

Отдельные испытания трактов передачи и приема группового преобразовательного оборудования можно осуществлять методом, подобным описанному в § 7.3, т. е. переносом частот шумовых щелей. В этом случае (при измерении одного тракта передачи) необходим только один генератор шума. Однако такие измерения выполняются редко, поскольку интерес представляет общая характеристика тракта.

7.5. Измерение «тракт — канал ТЧ»

Частоты щелей, выбранные для испытания тракта данной емкости, как правило, соответствуют частотам определенных каналов ТЧ в зависимости от используемого модуляционного плана. Это

позволяет помехозащищенность трактов приема одной или нескольких ступеней группового преобразования измерить подачей на вход соответствующего тракта приема первичной, вторичной, третичной и т. д. групп шумовой загрузки от одного генератора шума. При этом разность уровней при выключенном и включенном полосно-заграждающем фильтре определяется непосредственно при помощи псофометра или измерителя помех, подключенных к выходу того канала ТЧ, полоса частот которого соответствует частоте щели.

7.6. Каналопреобразующее оборудование и системы малой емкости

Помехозащищенность линейных трактов систем малой емкости (от 12 до 60 каналов) и каналопреобразующего оборудования можно измерять, комбинируя способы измерения, описанные в § 7.4 и 7.5. Иными словами, система может быть загружена шумовыми сигналами в спектре от 300 до 3400 Гц от некоррелированных источников, которые подаются на вход каждого канала ТЧ, а результирующие помехи измеряются при помощи измерителя помех или псофометра, подключаемых к выходу соответствующего канала ТЧ. Эти измерения легче выполнить, если пользоваться 12-канальным генератором шума. Такой генератор содержит 12 некоррелированных источников шума, каждый из которых работает в спектре от 300 до 3400 Гц; переключаются источники индивидуально.

При измерении помехозащищенности от переходного разговора или нелинейности, например в 12-канальной системе или каналопреобразующем оборудовании, поступают следующим образом. Каждый канал загружают шумом с номинальным уровнем мощности, который может быть определен по уравнению (2) § 6.1:

$$\text{уровень мощности шума на канал} = -1-6 \lg N \text{ дБм0}. \quad (1)$$

Затем помехозащищенность, например 6-го канала, может быть измерена путем подключения измерителя помех к выходу этого канала. Помехозащищенность представляет собой разность:

«Уровня мощности шума при загрузке всех каналов и уровня мощности помех при загрузке каналов с 1-го по 5-й и с 7-го по 12-й».

Измеренная таким образом помехозащищенность будет определяться собственными помехами, переходным разговором и нелинейностью. Очевидно, собственные помехи могут быть измерены путем снятия загрузки и измерения остаточных помех в канале. Переходной разговор возникает из-за недостаточной фильтрации. Следовательно, переходной разговор появляется, например, в канале 6 при загрузке только каналов 5 и 7. Следовательно, разность между уровнями мощности переходного разговора и собственных помех может быть измерена как разность между уровнем

мощности помех при загрузке 5 и 7-го каналов и уровнем мощности помех без загрузки.

Такая последовательность измерений позволяет отдельно определить помехи за счет нелинейности, переходного разговора и теплового эффекта. Однако при уровне мощности загрузки, соответствующей ур-нию (1), можно определить только номинальные

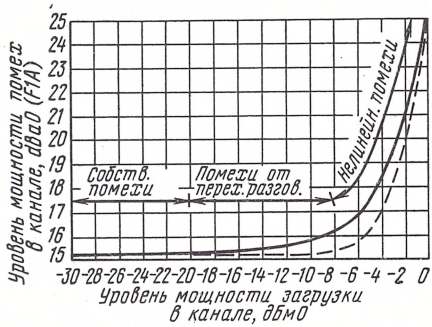


Рис. 7.6.1. Зависимость уровня мощности помех в канале ТЧ от уровня мощности загрузки других каналов системы сигналом шума

параметры системы. На рис. 7.6.1 показана типичная зависимость уровня мощности помех в канале от уровня мощности загрузки при загрузке всех других каналов системы. Три участка этой кривой соответствуют трем отдельным источникам помех.

Сначала уровень мощности помех постоянен, так как собственные помехи не зависят от загрузки. На этом участке преобладают собственные помехи. Далее с ростом уровня мощности загрузки уровень мощности помех начинает медленно возрастать, что объясняется действием переходного разговора. И, наконец, когда начинают преобладать нелинейные помехи, уровень мощности помех быстро увеличивается с ростом загрузки и достигает порога перегрузки. Штриховой линией на рис. 7.6.1 показан уровень мощности помех, вызванных только собственными помехами и нелинейностью (аналогично рис. 7.1.2). Различие между этими двумя кривыми четко показывает влияние переходного разговора, который в данном примере увеличивает уровень мощности помех максимально, примерно на 1 дБ.

7.7. Узлы систем с высокой помехозащищенностью

Методом загрузки белым шумом могут быть испытаны отдельные узлы многоканальных систем. Как правило, помехозащищенность узлов выше общей помехозащищенности системы. Если помехозащищенность испытуемого узла соизмерима с помехозащищенностью установки для измерения белым шумом, необходимо корректировать результаты измерений. При этом прежде всего нужно соединить приборы установки «на себя» (т. е. подключить передатчик непосредственно к приемнику). На выходе пере-

датчика устанавливается уровень, требуемый для испытания узла, и измеряется собственная помехозащищенность установки. Фактическая помехозащищенность испытуемого узла вычисляется путем прибавления поправочного коэффициента к величине помехозащищенности, полученной при измерении. Поправочный коэффициент определяется по рис. 7.7.1 в зависимости от разности между измеренной и собственной помехозащищенностью. Этот способ может быть пояснен следующим примером.

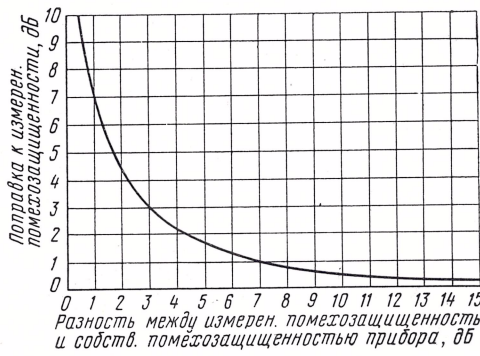


Рис. 7.7.1. Поправки при измерениях величин помехозащищенности, близких к собственной помехозащищенности измерительной установки

Измеренное значение помехозащищенности испытуемого узла составляет 68 дБ. Собственная помехозащищенность установки при том же уровне мощности сигнала шума равна 72,5 дБ. По разности в 4,5 дБ из рис. 7.7.1 находим поправочный коэффициент, равный 2 дБ. Таким образом, фактическое значение помехозащищенности испытуемого узла составляет $68 + 2 = 70$ дБ. Вывод уравнения кривой, показанной на рис. 7.7.1, приведен в приложении 4.

7.8. Измерение помех при реальной загрузке

Оценка качества системы при загрузке белым шумом является идеальной при исследованиях, разработке, выпуске и сдаче в эксплуатацию системы. Однако недостаток метода заключается в том, что при испытаниях в процессе эксплуатации систем реальная загрузка из измеряемого тракта должна быть переведена на резервный тракт. Существуют международные рекомендации по измерению помех, известные как измерения вне полосы (см. § 8.7), которые могут осуществляться во время передачи реальной загрузки. В этом случае измерительный канал размещается приблизительно в 10% от края полосы частот тракта и на входе измеряемого тракта системы включается полосно-заграждающий фильтр для уменьшения помех, создаваемых оборудованием передачи в полосе частот измерительного канала. Приемник белого шума, настроенный на частоту этого канала, постоянно контролирует уровень мощности помех, вызванных реальной загрузкой тракта. Если измерительный канал расположен выше полосы частот тракта, то на результаты измерений больше сказываются изменения уровней мощности собственных помех и нелинейных искажений в трактах радиочастоты и промежуточной частоты ра-

диосистем. При размещении канала ниже полосы частот тракта обычно повышается чувствительность к изменениям помехозащищенности, происходящим в преобразовательном оборудовании.

Поскольку измерения осуществляются при реальной загрузке, их точность зависит от изменения уровня мощности сигналов реальной загрузки, и качество самого тракта может быть только оценено, а не измерено. Поэтому метод измерения вне полосы используется редко. Однако в настоящее время в США и некоторых других странах расширяются попытки автоматизировать контроль качества систем для того, чтобы обнаруживать ухудшение параметров систем в процессе эксплуатации.

7.9. Характеристики помех широкополосных магнитофонов

Магнитофон можно рассматривать как одноканальный широкополосный усилитель, что в ряде случаев позволяет удачно имитировать обычный сигнал белым шумом. Нелинейность магнитофона измеряется таким же способом, как и нелинейность тракта многоканальной системы, причем полоса частот шумовой загрузки должна совпадать с рабочей полосой частот магнитофона. Включение полосно-заграждающих фильтров при измерении помехозащищенности осуществляется обычным способом. Примером таких испытаний являются испытания оборудования для записи сигналов телеметрии ракет и космических кораблей. Испытания белым шумом предусмотрены, например для такого оборудования, устанавливаемого на ракетах всех классов и в космических центрах, Министерством обороны США*.

Глава 8 Обзор рекомендаций по испытаниям с загрузкой белым шумом

8.1. Ранние рекомендации МККР и МККТТ (оборудование типа «А»)

Самое раннее упоминание об измерении характеристик при помощи сигнала с непрерывным однородным спектром содержится в рекомендациях МККР, принятых на VIII Пленарной Ассамблее в Варшаве в 1956 г. Рекомендация 197 легла в основу следующих более подробных рекомендаций по испытаниям белым шумом. В то время частоты измерительных каналов и характеристики фильтров были еще на стадии изучения совместно с МККТТ. Рекомен-

* Документ IRIG118-71 (март 1971 г.) (Inter-Range Instrumentation Group of the Range — Методы испытаний телеметрических систем и подсистем).

дация 294 (Лос-Анджелес, 1959 г.) содержала подробные сведения о частотах фильтров и их характеристиках, а также об уровнях мощности сигнала шумовой загрузки и других параметрах. В 1963 г. в Женеве была принята Рекомендация 399, единственным отличием которой было введение требований для систем с большей емкостью. Эту Рекомендацию МККТТ включил в состав своей Рекомендации G228, принятой в Женеве в 1964 г. В соответствии с Рекомендацией 399 (Женева, 1963 г.) оборудование для испытаний с загрузкой белым шумом, описываемое в данной книге, названо оборудованием типа «А».

В рекомендациях для оборудования типа «А» указаны частоты фильтров нижних и верхних частот для систем различной емкости, а также частоты нижнего, среднего и верхнего измерительных каналов (щелей). Приведены характеристики фильтров нижних и верхних частот и полосно-заграждающих фильтров и уровни мощности сигналов шумовой загрузки, которые необходимо устанавливать.

Частоты фильтров типа «А». В табл. 8.1.1 приведены частоты полосно-ограничивающих фильтров, соответствующие Рекомендации 399 МККР, а также дополнительные частоты, обычно применяемые для систем, емкости которых не предусмотрены этой Рекомендацией. Заметим, что в таблице приводятся частоты измерительных каналов как для измерения в полосе, так и вне полосы; выбор одного из этих способов осуществляется администрацией стран самостоятельно, хотя измерения внутри полосы применяются значительно чаще.

Таблица 8.1.1. **Частоты фильтров, ограничивающих полосу частот шумового сигнала и измерительных каналов, типа «А». Рекомендация 399 МККР (Женева, 1963 г.)**

Число каналов	Границы полосы, кГц		Каналы для измерения внутри полосы тракта, кГц			Каналы для измерения вне полосы тракта, кГц	
	фильтр верхних частот	фильтр нижних частот	нижний	центральный	верхний	ниже полосы	выше полосы
12	12	60	27	40	56	—	—
24	12	108	40	70	105	—	—
36	12	156	40	70	105	—	—
48	12	204	40	105	185	—	—
60	12	252	40	185	245	—	—
60	60	300	70	185	270	50	331
120	60	552	70	270	534	50	607
240	60	1 052	70	534	1 002	50	—
300	60	1 300	70	534	1 248	50	1 499
600	60	2 660	70	1 248	2 438	50	3 200
960	60	4 028	70	2 438	3 886	50	4 715
960	316	4 188	534	2 438	3 886	270	4 715
1 200	316	5 564	534	3 886	5 340	270	6 300
1 800	316	8 204	534	3 886	8 002	270	9 023
2 700	316	12 388	534	3 886	12 150	270	13 627

Характеристики фильтров типа «А», ограничивающих полосу. Рекомендация гласит: «Внутри полосы пропускания уровень среднеквадратичного напряжения шума, измеренный в узкой полосе

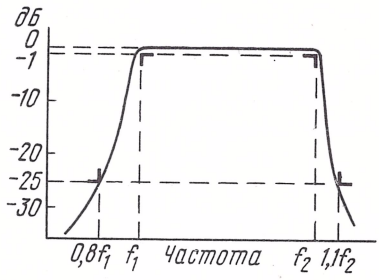


Рис. 8.1.1. Требования к частотной характеристике затухания последовательно включенных фильтров нижних и верхних частот типа «А», формирующих полосу частот сигнала белого шума

около 2 кГц, не должен изменяться более чем на 1 дБ. Вне полосы уровень мощности шума должен резко уменьшаться и быть снижен более чем на 25 дБ на всех частотах, отстоящих более чем на 10% от верхней и более чем на 20% от нижней границы полосы». На рис. 8.1.1 показана характеристика последовательно включенных фильтров верхних и нижних частот, соответствующих этому требованию.

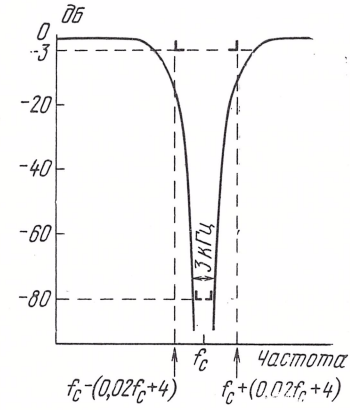


Рис. 8.1.2. Требования к частотной характеристике затухания полосно-задерживающего фильтра типа «А»

Характеристики измерительного канала оборудования типа «А». «Затухание шума в каждой полосе задерживания на выходе передатчика должно превышать 80 дБ в полосе, шириной, по крайней мере, 3 кГц и должно быть около, но не менее 3 дБ на расстоянии $+(0{,}02f_c + 4)$ кГц от центральной частоты f_c, выраженной в килогерцах». Это требование иллюстрируется рис. 8.1.2. Параметры полосно-пропускающих фильтров приемника не задаются, за исключением того, что полоса пропускания должна быть достаточно малой для совместной работы с полосно-заграждающими фильтрами, параметры которых соответствуют приведенным выше требованиям.

Уровни мощности сигнала шумовой загрузки. Уравнения для расчета уровней мощности номинальной загрузки определены в рекомендациях МККТТ. Они соответствуют ур-ниям (1) и (2) § 6.1. При включении Рекомендации МККР 399 в свою Рекомендацию G228 МККТТ сделал следующую оговорку: для уменьшения ошибки за счет ширины щели при измерениях не следует одновременно включать несколько полосно-заграждающих фильтров. Это обстоятельство рассмотрено ниже, в гл. 9.

8.2.
Стандарты DCA и MIL-STD

Министерство обороны США в документе MIL-STD-188C указывает в качестве нормы на параметры установок для измерения при загрузке белым шумом значения, приведенные в Рекомендации 294 МККР. Оборонное ведомство связи в документе DCA-330-175-1 в качестве такой нормы упоминает параметры из Рекомендации 399 МККР. Поскольку Рекомендации МККР 294 (1959) и 399 (1963) в значительной степени совпадают, оба этих военных стандарта США требуют проведения в настоящее время испытаний с загрузкой белым шумом при помощи измерительного оборудования типа «А».

8.3.
Последние рекомендации МККР и МККТТ (оборудование типа «В»)

При практических измерениях помехозащищенности приборами для испытания с загрузкой белым шумом (типа «А»), имеющими параметры, указанные в Рекомендации МККР 399, появляются ошибки, величину которых нельзя считать достаточно малой для получения заданной точности при измерении международных цепей. Поэтому в 1966 г. МККР выработал существенно иную рекомендацию по измерению с загрузкой белым шумом при размещении частот измерительных каналов внутри полосы частот шума. Эта Рекомендация 399-1 (Осло, 1966 г.) была воспроизведена без изменений в документах следующей ассамблеи (Нью-Дели, 1970 г.) и действует в настоящее время. Рекомендация 399-1 была включена в измененный вариант Рекомендации G228 МККТТ в Мар-Дель-Плата в 1968 г. И вновь МККТТ отметил, что полосно-заграждающие измерительные фильтры должны включаться только поочередно. Измерительные приборы, соответствующие Рекомендации 399-1 МККР, в этой книге называются оборудованием типа «В». Эта действующая Рекомендация значительно более подробна, чем Рекомендация 399, а оборудование типа «В» должно отвечать значительно более жестким требованиям, чем оборудование типа «А». Однако при этом обеспечивается большая точность измерений и лучшая совместимость аппаратуры, выпускаемой разными изготовителями.

Частоты фильтров типа «В». Частоты фильтров нижних и верхних частот, а также измерительных каналов приведены в табл. 8.3.1. Отметим, что в некоторых системах имеется возможность включать до семи измерительных каналов.

Характеристики фильтров типа «В», ограничивающих полосу шумового сигнала. В табл. 8.3.1 приведены допустимые отклонения номинальных эффективных частот среза. Под номинальной эффективной частотой среза понимается частота среза гипотетического фильтра, имеющего идеально прямоугольную характеристику среза

Таблица 8.3.1. **Частоты фильтров, ограничивающих полосу частот шумового сигнала и измерительных каналов оборудования типа «В» по Рекомендации 399-1 МККР (Осло, 1966 г.)**

Емкость системы, количество каналов ТЧ	Границы полосы, занятой каналами ТЧ, кГц	Эффективные частоты среза фильтров, ограничивающих полосу, кГц		Частоты имеющихся измерительных каналов, кГц
		нижних частот	верхних частот	
60	60—300	60±1	300±2	70 270
120	60—552	60±1	552±4	70 270 534
300	60—1300 64—1296	60±1	1296±8	70 270 534 1248
600	60—2540 64—2660	60±1	2600±20	70 270 534 1248 2438
960	60—4028 64—4024	60±1	4100±30	70 270 534 1248 2438 3886
900	316—4188	316±5	4100±30	534 1248 2438 3886
1260	60—5636 60—5564	60±1	5600±50	70 270 534 1248 2438 3886 5340
1200	316—5564	316±5	5600±50	534 1248 2438 3886 5340
1800	312—8120 312—8204 316—8204	316±5	8160±75	534 1248 2438 3886 5340 7600
2700	312—12 336 316—12 388 312—12 388	316±5	12 360±100	534 1248 2438 3886 5340 7600 11 700

и пропускающего сигнал шума с такой же мощностью, что и реальный фильтр. Затухание фильтров верхних частот должно быть, по крайней мере, 25 дБ на частотах, отстоящих от номинальной частоты среза более чем на 20%. Затухание фильтров нижних частот должно быть, по крайней мере, 20 дБ на частотах, отстоящих от номинальной частоты среза более чем на 10%, и, по крайней мере, 25 дБ на частотах, отстоящих от частоты среза более чем на 20%. В пределах полосы частот, ограниченной частотами крайних измерительных каналов, неравномерность суммарной частотной характеристики фильтров верхних и нижних частот не должна превышать 0,2 дБ. Эти требования иллюстрируются рис. 8.3.1.

Характеристики измерительных каналов оборудования типа «В». Полоса частот измерительных каналов оборудования типа «В» значительно у́же полос частот каналов оборудования типа

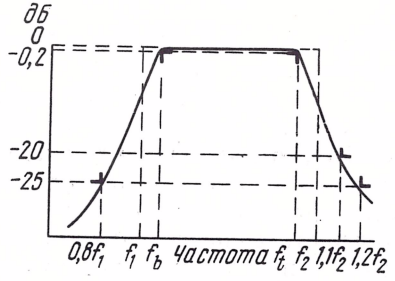


Рис. 8.3.1. Требования к частотной характеристике затухания последовательно включенных фильтров нижних и верхних частот типа «В»; f_b и f_t — частоты соответственно нижнего и верхнего измерительных каналов

Таблица 8.3.2. **Требования к полосно-заграждающим фильтрам типа «В» по Рекомендации 399-1 МККР (Осло, 1966 г.)**

Центральная частота f_c, кГц	Полоса, кГц, относительно f_c, в которой затухание должно быть не менее			Полоса, кГц, относительно f_c, вне которой затухание не должно превышать	
	70 дБ f_5	55 дБ f_4	30 дБ f_3	3 дБ f_2	0,5 дБ f_1
70	±1,5	±2,2	±3,5	±12	
270	±1,5	±2,3	±2,9	±8	
534	±1,5	±3,5	±7,0	±15	
1 248	±1,5	±4,0	±11,0	±35	
2 438	±1,5	±4,5	±19,0	±60	
3 886	±1,5	±15,0	±30,0	±110	
		±1,8	±3,5	±12	±100
5 340	±1,5	±2,2	±4,0	±14	±140
7 600	±1,5	±2,4	±4,6	±16	±200
11 700	±1,5	±3,0	±7,0	±20	±300

«А». При этом полосно-заграждающие фильтры для частот ниже 3886 кГц также выполняются на *LC*-элементах, для частот выше этой частоты используются кристаллические фильтры. Для частоты 3886 кГц задаются характеристики фильтров обоих типов. В предыдущих рекомендациях задавалось только два уровня затухания (3 и 80 дБ). Для фильтров типа «В» в зависимости от частоты задается полоса задерживания по 4 или 5 уровням затухания. В табл. 8.3.2 приведены **требуемые** характеристики, а на рис. 8.3.2 — пять полос задерживания, от f_1 до f_5. Как и в оборудовании типа «А», полоса частот полосно-пропускающих фильтров должна быть достаточно узкой для обеспечения их совместной работы с приведенными выше полосно-заграждающими фильтрами.

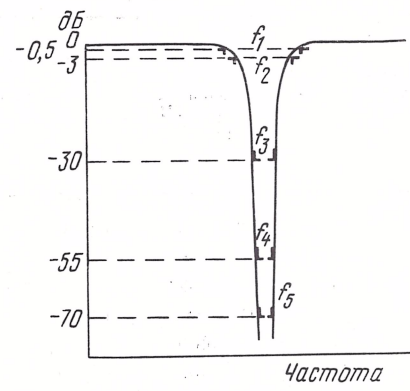


Рис. 8.3.2. Требования к частотной характеристике полосно-заграждающих фильтров типа «В», предъявляемые Рекомендацией 399-1 МККР (Осло, 1966 г.)

Указанные в Рекомендации МККТТ формулы для определения уровня мощности шумовой загрузки были приведены выше, однако шумовой передатчик должен обеспечивать выходные уровни, по крайней мере, на 10 дБ выше номинальных значений. Кроме того, шумовой сигнал на выходе передатчика должен иметь пик-фактор не менее 12 дБ, а неравномерность спектральной плотности мощности не должна превышать ±0,5 дБ при измерении прибором с полосой около 2 кГц. Эффективная полоса пропускания приемника должна быть не менее

1,7 кГц, а помехозащищенность измерительного комплекта, соединенного «на себя», должна быть не менее 67 дБ при номинальном уровне мощности загрузки. Существенные отличия оборудования типа «А» от оборудования типа «В» дополнительно рассмотрены в § 8.5, а допустимые комбинации фильтров и другие вопросы совместимости измерительных устройств — в § 8.6. В гл. 9, в которой обсуждаются факторы, влияющие на точность измерений помехозащищенности, показано, что оборудование типа «В» позволяет проводить измерения с более высокой точностью.

8.4. Рекомендации INTELSAT

Международное общество спутников связи (INTELSAT) опубликовало требования к характеристикам установок для измерения с загрузкой белым шумом, которые должны применяться на линиях через спутники связи «INTELSAT IV». Эти требования содержатся в Инструкции по работе спутников связи — Satellite System Operation Guide (см. библиографию). Требования предусматривают соответствие характеристик измерительных приборов Рекомендации 399-1 МККР и там, где имеется возможность, применение стандартных фильтров типа «В». При необходимости дополнительных частот требуемые характеристики фильтров были заданы «в духе» Рекомендации 399-1 МККР.

Таблица 8.4.1. **Частоты фильтров, ограничивающих полосу шумового сигнала, и измерительных каналов типа «В» (INTELSAT IV)**

Емкость системы, количество каналов ТЧ	Границы полосы, занятой каналами ТЧ, кГц	Эффективные частоты среза фильтров, ограничивающих полосу шумового сигнала, кГц		Частоты имеющихся измерительных каналов, кГц
		нижних частот	верхних частот	
24	12—108	12±0,5*	108±1*	16* 98*
36	12—156	12±0,5*	156±1	16* 140
60	12—252	12±0,5*	252±2*	16* 240*
72	12—300	12±0,5*	300±2+	16* 270+
96	12—408	12±0,5*	408±3	16* 240 394
132	12—552	12±0,5*	552±4+	16* 240 534+
192	12—804	12±0,5*	804±6	16* 394 770
252	12—1052	12±0,5*	1052±8	16* 534+ 1002
312	12—1300	12±0,5*	1296±8+	16* 534+ 1248+
432	12—1796	12±0,5*	1796±12	16* 534+ 1002 1730
612	12—2540	12±0,5*	2600±20+	16* 770 1730 2438+
792	12—3284	12±0,5*	3284±25	16* 1002 2438+ 3150
972	12—4028	12±0,5*	4100±30+	16* 1002 2438+ 3886+
1092	12—4892	12±0,5*	4892±40	70+ 1002 2438+ 4650
1872	12—8120	12±0,5*	8160±75+	70+ 1002 3150 5340+ 7600+

Таблица 8.4.2. **Требования к полосно-заграждающим фильтрам типа «В» (INTELSAT IV)**

Центральная частота f_c, кГц	Полоса частот, кГц, относительно f_c, в которой затухание должно быть не менее			Полоса частот, кГц, относительно f_c, вне которой затухание не должно превышать	
	70 дБ f_5	55 дБ f_4	30 дБ f_3	3 дБ f_2	0,5 дБ f_1
16*	±1,5	±2,1	±2,7	±5	±7
98	±1,5	±1,8	±2,1	±4	±9
140*	±1,5	±1,8	±2,2	±5	±14
240*	±1,5	±1,8	±2,2	±5	±21
394	±1,5	±3,0	±4,5	±11	±35
770	±1,5	±3,8	±8,0	±21	±70
1002	±1,5	±4,0	±9,0	±27	±90
1730	±1,5	±4,2	±14,0	±48	±155
3150	±1,5	±9,0	±22,0	±85	±285
4650	±1,5	±2,0	±3,8	±13	±120

В табл. 8.4.1 перечислены фильтры верхних и нижних частот и измерительные каналы, необходимые для ранних спектров INTELSAT IV и для более новых, «расширенных» несущих. Частоты, совпадающие с указанными в Рекомендации 399-1 МККР, помечены знаком «+». Характеристики дополнительных полосно-заграждающих фильтров приведены в табл. 8.4.2. Способ нормирования характеристик такой же, как в Рекомендации 399-1 МККР (см. табл. 8.3.2). Характеристики фильтров для систем на 24, 60 и 132 канала являются предметом исследования объединенной группы МККР/МККТТ: приложение 1 к Вопросу 8/С специальной исследовательской группы С (в таблицах отмечены *). Ожидается, что характеристики дополнительных фильтров «в духе» Рекомендации 399-1 МККР будут включены в документ МККР, который должен быть опубликован на следующей Пленарной Ассамблее.

8.5. Сравнение приборов типов «А» и «В»

Хотя приборами типа «В» уже пользуются в течение нескольких лет, однако в эксплуатации находится еще большое количество приборов типа «А», а некоторые изготовители продолжают поставлять ограниченное количество фильтров типа «А». Для того чтобы определить совместимость аппаратуры, соответствующей двум различным рекомендациям (§ 8.6), необходимо прежде всего определить существенные различия в требованиях к оборудованию типа «А» и «В».

Изменения частот фильтров нижних частот и измерительных каналов. В табл. 8.5.1 перечислены фильтры нижних частот и измерительные каналы, частоты которых были изменены. Фильтры

Таблица 8.5.1. **Изменение частот фильтров нижних частот и измерительных каналов**

Фильтр или измерительный канал	Частоты, кГц, соответствующие Рекомендации 399 МККР (Женева, 1963 г.)	Частоты, кГц, соответствующие Рекомендации 399-1 МККР (Осло, 1969 г.)
Фильтр нижних частот	1 300	1 296
	2 660	2 600
	4 028 и 4 188	4 100
	5 564	5 600
	8 204	8 160
	12 388	12 360
Измерительный канал	8 002	7 600
	12 150	11 700

нижних частот изменились мало. В оборудовании типа «А» измерительные каналы, расположенные в верхней части спектра частот линейных трактов систем на 1800 и 2700 каналов, отстояли от верхней граничной полосы тракта примерно всего на 2%. В оборудовании типа «В» для облегчения реализации новых фильтров нижних частот это расстояние увеличено примерно до 6%. Частотные характеристики этих фильтров должны быть равномерными с точностью 0,2 дБ в пределах всего спектра частот тракта, включая крайние в спектре тракта измерительные каналы.

Изменение требований к характеристикам фильтров, ограничивающих полосу. Эти изменения можно видеть, сравнивая рис. 8.1.1 и 8.3.1. Допустимое отклонение ширины эффективной полосы пропускания фильтров типа «А» значительно больше, чем фильтров типа «В», поэтому для фильтров типа «А» больше неточность установки уровня мощности шумовой загрузки в канале. Для фильтров типа «В» задано допустимое отклонение номинальной частоты среза (см. табл. 8.3.1 и 8.4.1). Это позволяет определить максимальную ошибку при установке плотности мощности шума (или уровня мощности шумовой загрузки на канал). Из табл. 8.5.2 видно, что максимальная погрешность установки уровня мощности загрузки в канале не превышает 0,07 дБ, а в основном не более 0,05 дБ. Неравномерность суммарной частотной характеристики включенных последовательно фильтров верхних и нижних частот снижена в 5 раз, от 1 до 0,2 дБ. В гл. 9 будет показано, что это влияет на точность измерения помехозащищенности.

Изменения характеристик измерительных каналов. Наиболее серьезные изменения претерпели требования к характеристикам измерительных каналов. В гл. 9 будет показано, что ширина измерительной щели существенно влияет на точность измерения помехозащищенности. Для уменьшения погрешности измерений, а также для обеспечения совместимости оборудования различных

Таблица 8.5.2. **Максимальная погрешность установки плотности мощности шума из-за допуска на частоты фильтров типа «В», ограничивающих полосу**

Емкость системы, количество каналов ТЧ	Границы полосы, занятой каналами ТЧ, кГц	Ширина полосы частот, ограниченной фильтрами, кГц	Общий допуск, кГц	Максимальная погрешность, дБ, установки плотности мощности
24	12—108	96	±1,5	0,07
60	12—252	240	±2,5	0,04
132	12—552	540	±4,5	0,04
60	60—300	240	±3,0	0,05
120	60—552	492	±5,0	0,04
300	60—1300 64—1296	1236	±9,0	0,03
600	60—2540 64—2660	2540	±21	0,04
960	60—4028 64—4024	4040	±31	0,03
900	316—4188	3800	±35	0,04
1260	60—5636 60—5564	5540	±51	0,04
1200	316—5564	5300	±55	0,04
1800	312—8120 312—8204 316—8204	7850	±80	0,04
2700	312—12 336 316—12 388 312—12 388	12 050	±105	0,04

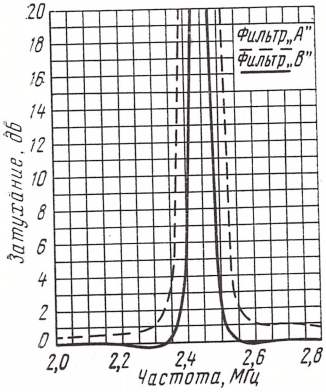


Рис. 8.5.1. Сравнение частотных характеристик затухания полосно-заграждающих фильтров типов «А» и «В» измерительного канала со средней частотой 2438 кГц

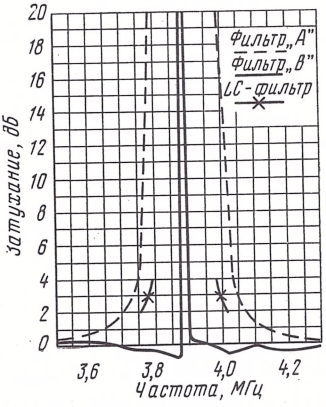


Рис. 8.5.2. Сравнение частотных характеристик затухания полосно-заграждающих фильтров типов «А» и «В» измерительного канала со средней частотой 3886 кГц

типов к полосно-заграждающим фильтрам предъявляются значительно более жесткие требования. При этом соответственно повышаются требования к полосовым фильтрам шумового приемника, а также к гетеродинам приемника. Хотя на частотах ниже 3886 кГц все еще используются полосно-заграждающие фильтры *LC*, их полосы задерживания в большинстве случаев значительно у́же полос аналогичных фильтров типа «А». На рис. 8.5.1 для сравнения приведены характеристики фильтров типа «А» и типа «В» измерительного канала со средней частотой 2438 кГц.

Сравнение кристаллического полосно-заграждающего фильтра измерительного канала со средней частотой 3886 кГц, с эквивалентным фильтром типа «А» (рис. 8.5.2) показывает, насколько сильно уменьшилась полоса задерживания полосно-заграждающего фильтра на более высоких частотах. Фактически полоса задерживания кристаллического фильтра для канала 3886 кГц в 13 раз у́же, чем полоса фильтра типа «А», а для канала 11 700 кГц это соотношение составляет 40 раз. Рекомендации МККР допускают два варианта характеристик фильтра для канала 3886 кГц (см. табл. 8.3.2). На рис. 8.5.2 изображены также точки фильтра *LC* с затуханием 3 дБ согласно Рекомендации 399-1. Полоса задерживания этого фильтра в 9 раз шире полосы соответствующего ему кристаллического фильтра.

Таблица 8.5.3. **Относительная ширина полос задерживания верхних полосно-заграждающих фильтров типов «А» и «В»**

Емкость системы, количество каналов ТЧ	Ширина полосы системы, кГц	Верхний измерительный канал, кГц	Фильтры типа «В»		Фильтры типа «А»	
			Ширина щели, кГц	Ширина щели в % от ширины полосы	Ширина щели, кГц	Ширина щели в % от ширины полосы
60	240	270	16	6,7	41	17,0
120	492	534	30	6,1	62	12,6
300	1 236	1 248	70	5,7	140	11,2
600	2 540	2 438	120	4,7	225	8,9
900	3 800	3 886	24	0,63	315	8,3
1 200	5 300	5 340	28	0,53	500	9,4
1 800	7 850	7 600	32	0,41	—	—
		8 002	—	—	1 000	12,7
2 700	12 050	11 700	40	0,33	—	—
		12 150	—	—	1 600	13,3

Практически во всех многоканальных системах применяется предыскажение выходных уровней, которое увеличивает эффективную ширину полосы частот верхнего измерительного канала и уменьшает ширину полосы частот нижнего канала. Поэтому интересно сопоставить полосы задерживания фильтров типа «А» и типа «В» верхнего измерительного канала для систем разной емкости. В табл. 8.5.3. показано, какую часть спектра сигнала задерживают полосно-заграждающие фильтры верхних измеритель-

ных каналов. В 60-канальной системе фильтр типа «А» задерживает сигналы 17% полосы (0,8 дБ), а фильтр типа «В» — 6,7% (0,3 дБ). Для системы емкостью 2700 каналов эти величины составляют соответственно 13,3% (0,62 дБ) и 0,33% (0,014 дБ). Кристаллический фильтр на частоту 3886 кГц задерживает сигналы 0,63% полосы (0,03 дБ), а аналогичный ему LC-фильтр (параметры которого соответствуют Рекомендации 399-1) — 5,8% (0,26 дБ).

В Рекомендации 399-1 указано несколько других параметров, которые либо отличаются, либо вовсе не были включены в Рекомендацию 399. К ним относятся величина пик-фактора генерируемого белого шума (12 дБ), а также неравномерность спектральной плотности ($\pm 0{,}5$ дБ). Влияние этих параметров на точность измерения помехозащищенности показано в гл. 9. Однако эти параметры не сказываются на совместимости измерительных устройств различных типов.

8.6. Совместимость аппаратуры

Следует рассматривать совместимость аппаратуры в двух различных аспектах: во-первых, совместимость аппаратуры разных изготовителей, соответствующей одной и той же рекомендации; во-вторых, совместимость аппаратуры одного изготовителя, но соответствующей различным рекомендациям.

Различные изготовители. На разных концах измеряемого тракта может оказаться оборудование различных изготовителей, особенно в случае измерения трактов международных линий. Если измерение проводится не шлейфом (нетиповой случай), может потребоваться, чтобы передатчик шума одного изготовителя работал совместно с приемником шумового сигнала другого изготовителя и наоборот. Это послужило одной из причин ужесточения рекомендаций МККР в 1966 г., так как согласно рекомендации для оборудования типа «А» многие параметры измерительной аппаратуры были оставлены на усмотрение изготовителя. В этом случае возможность совместной работы приборов различных изготовителей не гарантировалась, поскольку каждый изготовитель был свободен в выборе параметров. При ужесточении требований была также сделана попытка уменьшить собственную погрешность аппаратуры (см. гл. 9).

Для подтверждения возможности совместной работы и повторяемости параметров оборудования типа «В» ведомствами связи и изготовителями установок для загрузки белым шумом было проведено много испытаний с загрузкой белым шумом различных систем. При измерении аппаратурой, полностью соответствующей рекомендациям для оборудования типа «В», например аппаратурой фирмы «Marconi Instruments», можно ожидать совпадения значений помехозащищенности с точностью $\pm 0{,}5$ дБ. Это относится к случаям измерения трактов как при использовании аппаратуры од-

ного изготовителя, так и передатчика одного изготовителя, а приемника другого изготовителя и наоборот. Так как величина ±0,5 дБ близка к предельной точности отсчета при измерении приемником сигнала шума или помехи в узкой полосе щели, ясно, что стремление МККР обеспечить возможность совместной работы аппаратуры различных изготовителей полностью реализовано.

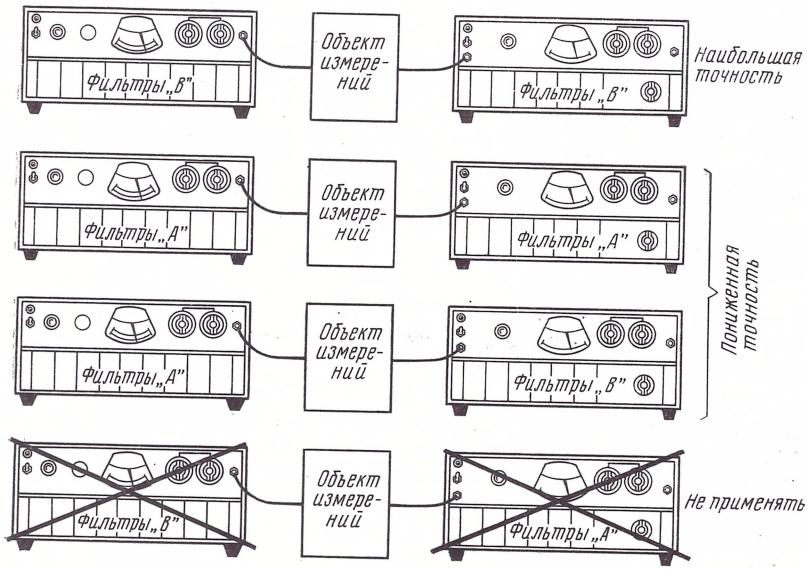


Рис. 8.6.1. Допустимые варианты совместной работы передатчиков и приемников оборудования различных типов

Различные рекомендации. В приемнике белого шума имеются полосовые фильтры, средние частоты которых совпадают с частотами полосно-заграждающих фильтров передатчика, а ширина полосы пропускания у́же полосы задерживания (см. § 6.5). Эти полосовые фильтры уменьшают нелинейность приемника, пропуская на его вход только сигнал измерительного канала и подавляя шум в остальной полосе. Отсюда ясно, что если полоса пропускания полосового фильтра шире, чем полоса задерживания соответствующего ему полосно-заграждающего фильтра, то может возникнуть погрешность измерений из-за нелинейности приемника. Поскольку полоса пропускания полосовых фильтров типа «А» шире, чем полоса задерживания полосно-заграждающих фильтров типа «В», совместное использование приемника типа «А» и передатчика типа «В» недопустимо. На рис. 8.6.1 показаны допустимые сочетания приемников и передатчиков, причем наибольшая точность достигается в варианте, изображенном вверху. В табл. 8.5.1 показано, что при замене рекомендации для оборудования типа «А» на рекомендацию для оборудования типа «В» были изменены час-

тоты только двух измерительных каналов, а именно: вместо 8002 кГц введена 7600 кГц и вместо 12 150 кГц введена 11 700 кГц. Все другие измерительные каналы в оборудовании типа «А» и типа «В» совпадают. Крайне важно убедиться в том, что не применяется аппаратура, содержащая фильтры с частотами, соответствующими разным рекомендациям.

8.7. Рекомендации по измерениям помех при реальной загрузке

Об измерении помех при передаче реальной загрузки (вне полосы) говорилось в § 7.8. Впервые описанный в Рекомендации 293 МККР (Лос-Анджелес, 1959 г.) этот способ сохранился практически неизменным в Рекомендациях 398 (Женева, 1963 г.), 398-1 (Осло, 1966 г.) и в ныне действующей Рекомендации 398-2 (Нью-Дели, 1970 г.). Заданы характеристики полосно-заграждающих фильтров, включаемых на входах систем. При помощи этих фильтров уменьшаются помехи, вносимые в полосы измерительных каналов оборудованием, включенным до точки, являющейся входом измеряемого тракта. Характеристики полосно-заграждающих

Таблица 8.7.1. **Рекомендуемые измерительные каналы для шумовых измерений при реальной загрузке — Рекомендация 398-2 МККР (Нью-Дели, 1970)**

Емкость системы, число каналов ТЧ	Границы полосы, занятой каналами ТЧ, кГц	Границы полосы частот линейного тракта[1]	Центральные частоты f шумовых измерительных каналов, кГц		
			ниже полосы частот тракта	выше полосы частот тракта	
				(*a*)	(*b*)
24	12—108	12—108	10	116 или 119	[2]
60	12—252	12—252	10	304	[2]
	60—300	60—300	50	331	[2]
120	12—552	12—552	10	607	600
	60—552	60—552	50	607	600
300	60—1300	60—1364	50	1499	1549
	60—1296				
600	60—2540	60—2792	50	3200	3250
	64—2660				
960	60—4028	60—4287	50	4715	4765
900	316—4188	60—4287	270	4715	4765
1260	60—5564	60—5680	50	6199	6300
	60—5636				
1200	316—5564	60—5680	270	6199	6300
1800	312—8204	300—8248	270	9023	9073
	316—8204				
2700	312—12 388	308—12 435	270	13 627	[2]
	316—12 388				

[1] Включая контрольные частоты и другие сигналы, которые могут быть переданы в линию.

[2] Эти величины будут даны после дополнительных экспериментов.

фильтров типа «В» подобны характеристикам аналогичных фильтров типа «А», т. е. полоса задерживания пропорциональна центральной частоте:

«Затухание полосно-заграждающих фильтров на входе системы должно превышать 50 дБ в полосе не менее ($\pm 0{,}005f + 2$) кГц* (f — центральная частота измерительного канала, кГц). Затухание, вносимое полосно-заграждающими фильтрами на нижней и верхней граничных частотах спектра многоканального сигнала, не должно превышать 0,3 дБ по отношению к их затуханию в центре спектра многоканального сигнала».

Частоты фильтров, рекомендованных для измерений ниже или выше линейного спектра, перечислены в табл. 8.7.1. Частоты в колонке *(a)* совпадают с управляющими частотами радиосистем[29] (см. § 2.8) и рекомендуются для использования при объединенном контроле уровня КЧ и измерении помех. Частоты из колонки *(b)* рекомендуется использовать при обычных измерениях вне полосы с применением приемника белого шума.

Глава 9 Факторы, влияющие на точность измерения помехозащищенности

9.1. Вводные замечания о точности измерения помехозащищенности

В предыдущих главах несколько раз отмечалось, что существует много факторов, определяющих точность измерения помехозащищенности. Эти факторы можно разделить на несколько групп. К первой группе относятся те, которые определяются параметрами передатчика и установленных в нем фильтров, ограничивающих полосу; ко второй группе — факторы, определяемые параметрами приемника. Третьим и наиболее значительным фактором являются ширина полосы измерительного канала и влияние АРУ передатчика на погрешность измерения помехозащищенности, вызванную измерительным каналом. На эту погрешность влияют, кроме того, уровень загрузки, порядок нелинейных искажений и применение предыскажения в системе. В этой главе каждая из перечисленных групп рассматривается отдельно. Глава завершается примером расчета погрешности измерения помехозащищенности, в котором учтено влияние всех перечисленных факторов.

Прежде чем обсуждать различные факторы, влияющие на точность измерения помехозащищенности, необходимо получить правильное представление о форме кривой помехозащищенности. Только в этом случае может быть определено влияние различных

---

* Кроме фильтра на частоту 10 кГц, где минимальная полоса частот составляет 10 ± 1 кГц.

[29] radio continuity pilots.

факторов на погрешность измерений помехозащищенности при различных загрузках системы от ее линейного состояния до уровней сигнала, при которых преобладают нелинейные искажения.

9.2. Нормализованные кривые помехозащищенности и отношения сигнал/помеха

Можно убедиться (см. приложение 5), что, несмотря на конкретный вид зависимости помехозащищенности от уровня мощности сигнала загрузки для каждой данной системы, форма кривой помехозащищенности, в принципе, определяется порядком преобла-

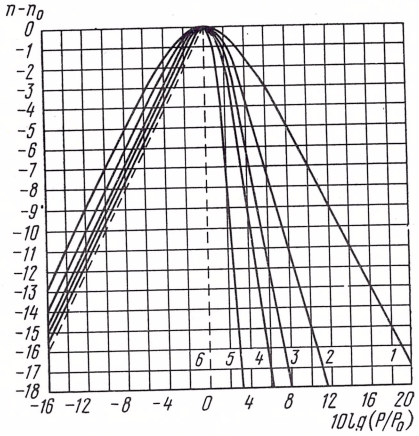


Рис. 9.2.1. Нормализованные кривые помехозащищенности, показывающие зависимость помехозащищенности от уровня мощности загрузки тракта и порядка преобладающих в тракте нелинейных искажений:

1 — нелинейные искажения 2-го порядка ($\gamma = 2$); *2* — нелинейные искажения 3-го порядка ($\gamma = 3$); *3* — нелинейные искажения 4-го порядка ($\gamma = 4$); *4* — нелинейные искажения 5-го порядка ($\gamma = 5$); *5* — нелинейные искажения 10-го порядка ($\gamma = 10$); *6* — предельная кривая при $\gamma \to \infty$

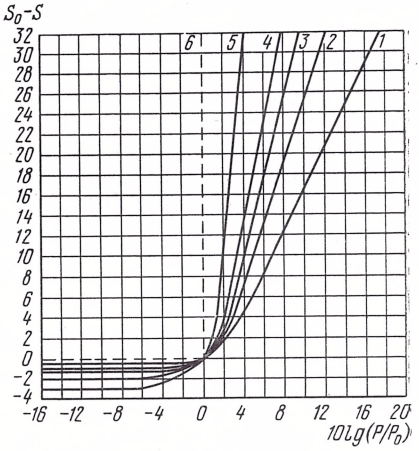


Рис. 9.2.2. Нормализованные кривые отношения сигнал/помеха, показывающие зависимость отношения сигнал/помеха от уровня мощности загрузки тракта и порядка преобладающих в тракте нелинейных искажений:

1 — нелинейные искажения 2-го порядка ($\gamma = 2$); *2* — нелинейные искажения 3-го порядка ($\gamma = 3$); *3* — нелинейные искажения 4-го порядка ($\gamma = 4$); *4* — нелинейные искажения 5-го порядка ($\gamma = 5$); *5* — нелинейные искажения 10-го порядка ($\gamma = 10$); *6* — предельная кривая при $\gamma \to \infty$

дающих в системе нелинейных искажений. Это позволяет нормализовать теоретические кривые помехозащищенности, т. е. указывать снижение помехозащищенности относительно ее максимального значения $(n - n_0)$, а уровень загрузки привести в децибелах относительно уровня p_0, соответствующего максимальной помехозащищенности. Подобным образом могут быть построены теоретические кривые отношения сигнал/помеха с указанием отклонения

отношения сигнал/помеха от его значения, соответствующего максимальной помехозащищенности ($s_0 - s$).

На рис. 9.2.1 и 9.2.2 изображены теоретические нормализованные кривые помехозащищенности и отношения сигнал/помеха для систем с преобладанием нелинейных искажений 2, 3, 4, 5 и 10-го порядков. Эти кривые получены из следующих соотношений, выведенных в приложении 5:

$$n - n_0 = 10 \lg \left(\frac{P}{P_0}\right) - 10 \lg \left[\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\gamma} + (\gamma - 1)\right] + 10 \lg \gamma; \qquad (1)$$

$$s_0 - s = 10 \lg \left[\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\gamma} + (\gamma - 1)\right] - 10 \lg \gamma, \qquad (2)$$

где $n - n_0$ — отклонение помехозащищенности от ее максимального значения n_0; $s_0 - s$ — отклонение отношения сигнал/помеха от его значения s_0, соответствующего максимальной помехозащищенности n_0; 10 lg (P/P_0) — уровень мощности сигнала загрузки в децибелах относительно уровня p_0, при котором помехозащищенность максимальная и γ — преобладающий порядок нелинейных искажений в системе (2, 3-й и т. д.).

Форму этих кривых можно сравнить с реальными кривыми, изображенными на рис. 7.1 и 7.1.2, на которых видно преобладание нелинейных искажений 2-го порядка.

9.3. Три зоны кривой помехозащищенности

Можно считать, что нормализованная кривая помехозащищенности состоит из трех отдельных зон. Первая из них является линейной зоной, в пределах которой на помехозащищенность при изменении загрузки влияют только собственные помехи. Во второй зоне, около максимального значения помехозащищенности, существуют как нелинейные помехи, так и собственные помехи. В третьей, нелинейной зоне, собственными помехами можно пренебречь по сравнению с помехами из-за нелинейных искажений.

Линейная зона. В этой зоне

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\gamma} \ll (\gamma - 1).$$

Учитывая это неравенство из (1) и (2), получаем соответственно:

$$n - n_0 = 10 \lg \left(\frac{P}{P_0}\right) + 10 \lg \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1}\right); \qquad (3)$$

$$s_0 - s = -10 \lg \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1}\right). \qquad (4)$$

Эти соотношения согласуются с результатами измерений, так как при увеличении уровня загрузки на 1 дБ помехозащищенность увеличивается на 1 дБ, а отношение сигнал/помеха остается постоян-

ным (поскольку имеют место только собственные помехи). Для системы с преобладанием нелинейности 2-го порядка в линейной зоне отношение сигнал/помеха будет на 3 дБ выше этого отношения при максимальной помехозащищенности.

Зона максимальной помехозащищенности. Точка максимальной помехозащищенности может быть найдена путем дифференцирования ур-ния (1) и решения его относительно 0. Для точки максимальной помехозащищенности при этом получаем следующее соотношение:

мощность собственных помех = $(\gamma - 1) \times$ мощность нелинейных помех.

Таким образом, для системы с преобладанием нелинейности 2-го порядка ($\gamma=2$) максимальная помехозащищенность будет наблюдаться при равенстве мощностей нелинейных и собственных помех.

Нелинейная зона. В этой зоне

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\gamma} \gg (\gamma - 1).$$

С учетом этого неравенства из (1) и (2) получаем соответственно:

$$n - n_0 = 10 \lg \gamma - (\gamma - 1)\, 10 \lg \left(\frac{P}{P_0}\right); \qquad (5)$$

$$s_0 - s = \gamma\, 10 \lg \left(\frac{P}{P_0}\right) - 10 \lg \gamma. \qquad (6)$$

Эти выражения позволяют сделать два важных вывода. В нелинейной зоне увеличение уровня мощности сигнала загрузки на 1 дБ снижает помехозащищенность на $(\gamma - 1)$ дБ, а отношение сигнал/помеха уменьшается на γ дБ. Этот вывод позволяет определить порядок преобладающих в системе нелинейных искажений при любом уровне мощности сигнала в любой точке нелинейной зоны. Например, если при увеличении уровня мощности сигнала загрузки на 1 дБ помехозащищенность падает на 2 дБ, преобладает нелинейность 3-го порядка. При этом отношение сигнал/помеха будет уменьшаться на 3 дБ с увеличением уровня мощности сигнала загрузки на 1 дБ.

Из изложенного следует, что в линейной области погрешность установки выходного уровня передатчика шума непосредственно сказывается на точности измерения помехозащищенности, а в нелинейной зоне влияние этой погрешности увеличивается в $(\gamma - 1)$ раз.

9.4. Параметры передатчика сигнала шума

Основное значение для снижения погрешности измерений помехозащищенности имеет правильный выбор двух параметров передатчика сигнала шума. Прежде всего, как показано в предыдущих

параграфах, любая неточность при установке общей мощности шума вызовет погрешность измерения помехозащищенности. Точность установки уровня мощности шума определяется классом точности индикатора мощности передатчика и выходного аттенюатора. В примере, приведенном в § 9.11, общая погрешность определена как средняя квадратичная этих двух параметров. Точность частоты среза фильтров, ограничивающих полосу частот шума, определяет ширину спектра шума и, следовательно, уровень мощности сигнала загрузки в спектре одного канала. Этот фактор далее не рассматривается, поскольку из табл. 8.5.2 видно, что влияние его незначительно при использовании фильтров типа «В». Прямое влияние на точность измерения помехозащищенности оказывает неравномерность спектральной плотности мощности шума, поскольку первоначально измеряемый уровень мощности сигнала шума в измерительном канале при выключенном полосно-заграждающем фильтре зависит от этого параметра. Напомним, что при включении двух фильтров типа «А» неравномерность должна быть не более 1 дБ, а при включении двух фильтров типа «В» — не более 0,2 дБ.

Таким образом, погрешность измерения помехозащищенности, вносимая передатчиком сигнала шума (исключая влияние ширины щели), определяется следующим образом:

Линейная зона:

$$e_g = \pm \sqrt{e_{ag}^2 + e_{mg}^2 + e_f^2}\,. \qquad (7)$$

Нелинейная зона:

$$e_g = \pm \sqrt{(\gamma - 1)^2 \left(e_{ag}^2 + e_{mg}^2 \right) + e_f^2}, \qquad (8)$$

где e_g — погрешность измерения помехозащищенности, вносимая передатчиком; e_{ag} — погрешность аттенюатора; e_{mg} — погрешность индикатора мощности; e_f — неравномерность спектральной плотности мощности в полосе частот шума.

9.5. Параметры приемника сигнала шума

Выше было показано, что полосовые фильтры используются для уменьшения нелинейности приемника. Для существующих приемников сигнала шума влияние нелинейности приемника на погрешность измерений незначительно. При использовании метода компенсации, т. е. восстановлении на индикаторе приемника первоначального уровня, единственным источником погрешности является неточность затухания аттенюатора, по которому производится отсчет значения помехозащищенности. Если же часть значения помехозащищенности отсчитывается непосредственно по шкале индикатора, должна быть принята во внимание линейность шкалы индикатора. Таким образом, погрешность измерения помехозащищенности, возникающая при работе приемника, может быть подсчитана следующим образом.

При измерении помехозащищенности методом компенсации

$$e_r = e_{ar}. \tag{9}$$

При измерении помехозащищенности с отсчетом по аттенюатору и индикатору

$$e_r = \pm \sqrt{e_{ar}^2 + e_{mr}^2}, \tag{10}$$

где e_r — погрешность измерения помехозащищенности, возникающая в приемнике; e_{ar} — погрешность аттенюатора; e_{mr} — погрешность индикатора.

9.6. Влияние ширины щели на точность измерения помехозащищенности

При включении полосно-заграждающего фильтра затухание, вносимое в полосе задерживания, уменьшает мощность сигнала шума. Если составляющие шума, расположенные внутри полосы задерживания фильтра, создают продукты нелинейности, также попадающие внутрь полосы задерживания, то очевидно, что при подавлении этих основных составляющих путем включения полосно-заграждающего фильтра уровень мощности измеряемых продуктов нелинейности уменьшится по сравнению с его фактическим значением. В результате получится «оптимистическое» значение помехозащищенности. Естественно предположить, что чем шире полоса задерживания фильтра, тем больше проявляется этот эффект. Реальная погрешность будет также определяться положением щели в полосе частот сигнала шума и порядком преобладающих искажений. Следует ожидать, что при использовании в системе предыскажения этот эффект увеличится, если щель будет расположена в верхней части диапазона частот сигнала шума (см. § 9.8).

Именно по этой причине в рекомендациях для оборудования типа «В» даются параметры значительно более узкополосных фильтров (см. § 8.3), а в Рекомендации G228 МККТТ отмечается, что фильтры следует включать при измерениях по одному для исключения их одновременного влияния. Был выполнен количественный анализ этой общей задачи, в результате которого получены поправки, приведенные в табл. 9.6.1 и 9.6.2. Методика и исходные выражения, из которых получены данные таблиц, приведены в приложении 6.

Коэффициенты ширины щели и полосы шума. Анализ показал, что уменьшение продуктов нелинейности (т. е. погрешность измерения помехозащищенности) является функцией трех основных переменных. Отношение ширины щели к спектру шума обозначено a. Погрешность является также функцией коэффициента b ширины спектра, который определяется как отношение нижней частоты спектра к его ширине. Эти две переменные показаны на рис. 9.6.1, где ширина спектра $f_2 - f_1$, а ширина щели δf. В рабо-

Таблица 9.6.1. **Поправки к измеряемому значению помехозащищенности, дБ, компенсирующие погрешность из-за «вырезания» части спектра сигнала шума в передатчике полосно-заграждающим фильтром нижнего измерительного канала**

Емкость системы, число каналов ТЧ	Ширина полосы, кГц	Система без предыскажения												Предыскажение 4 дБ							
		При преобладании в измеряемых трактах продуктов нелинейности указанных ниже порядков																			
		2-й порядок				3-й порядок				4-й порядок				2-й порядок				3-й порядок			
		Фильтры «А»		Фильтры «В»		Фильтры «А»		Фильтры «В»		Фильтры «А»		Фильтры «В»		Фильтры «А»		Фильтры «В»		Фильтры «А»		Фильтры «В»	
		ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ
12	12—60	0,3	—1,3	0,3	—1,7	—1,3	—3,6	—1,4	—4,5	1,6	—1,6	2,0	—2,1	1,2	—0,4	1,5	—0,5	0,1	—2,3	0,3	—2,8
24	12—108	0,3	—0,5	0,4	—0,6	—0,6	—1,7	—0,8	—2,2	0,9	—0,6	0,9	—0,8	0,7	—0,1	0,9	—0,1	—	—1,1	—	—1,4
36	12—156	0,2	—0,3			—0,4	—1,1			0,6	—0,4			0,5	—			—	—0,7		
48	12—204	0,2	—0,2			—0,2	—0,8			0,4	—0,3			0,3	—			—	—0,5		
60	12—252	0,1	—0,2	0,2	—0,2	—0,2	—0,6	—0,2	—0,8	0,3	—0,2	0,4	—0,3	0,3	—	0,3	—	—	—0,4	—	—0,5
60	60—300	0,2	—0,6	0,2	—0,7	—0,8	—2,1	—0,8	—2,2	0,9	—0,8	1,0	—0,9	0,7	—0,2	0,8	—0,2	—	—1,3	—	—1,4
72	12—300	0,1	—0,1	0,1	—0,2	—0,1	—0,5	—0,3	—0,6	0,3	—0,2	0,4	—0,3	0,2	—	0,3	—	—	—0,3	—	—0,4
96	12—408			0,1	—0,1			—0,1	—0,5			0,3	—0,2			0,2	—			—	—0,3
120	60—552	0,2	—0,2	0,2	—0,3	—0,3	—0,9	—0,3	—1,0	0,5	—0,3	0,5	—0,4	0,4	—	0,4	—	—	—0,6	—	—0,7
132	12—552			0,1	—0,1			—0,1	—0,3			0,2	—0,1			0,2	—			—	—0,2
192	12—804			0,1	—0,1		—0,1	—0,1	—0,2			0,1	—0,1			0,1	—			—	—0,2
252	12—1052	—	—	—	—		—0,3	—	—0,2	0,1	—0,1	0,1	—0,1	0,1	—	0,1	—	—	—0,1	—	—0,1
300	60—1300	0,1	—0,1	0,1	—0,1	—0,1		—0,1	—0,4	0,2	—0,1	0,2	—0,1	0,2	—	0,2	—	—	—0,2	—	—0,2
432	12—1796			—	—			—	—0,1			0,1	—			—	—			—	—0,1
600	60—2600	—	—	—	—	—	—0,2	—	—0,2	0,1	—0,1	0,1	—0,1	0,1	—	0,1	—	—	—0,1	—	—0,1
612	12—2600			—	—			—	—0,1			—	—			—	—			—	—
792	12—3284			—	—			—	—0,1			—	—			—	—			—	—
900	316—4100	0,1	—0,1	—	—	—0,1	—0,3	—	—0,2	0,1	—0,1	0,1	—0,1	0,1	—	0,1	—	—	—0,2	—	—0,1
960	60—4100	—	—	—	—	—	—0,1	—	—0,1	0,1	—	0,1	—	—	—	—	—	—	—0,1	—	—0,1
972	12—4100			—	—			—	—			—	—			—	—			—	—
1200	316—5600	—	—	—	—	—0,1	—0,2	—	—0,1	0,1	—0,1	0,1	—	0,1	—	—	—	—	—0,1	—	—0,1
1260	60—5600	—	—	—	—	—	—0,1	—	—0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—0,1
1800	316—8160	—	—	—	—	—	—0,1	—	—0,1	—	—	—	—	0,1	—	—	—	—	—0,1	—	—
1872	12—8160			—	—			—	—			—	—			—	—			—	—
2700	316—12360	—	—	—	—	—	—0,1	—	—	0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—0,1	—	—

Сокращения: ПОМ — постоянная общая мощность; ППМ — постоянная плотность мощности; «—» — поправка менее 0,05 дБ.

Таблица 9.6.2. **Поправки к измеряемому значению помехозащищенности, дБ, компенсирующие погрешность из-за «вырезания» части спектра сигнала шума в передатчике полосно-заграждающим фильтром верхнего измерительного канала**

Емкость системы (число каналов ТЧ)	Ширина полосы, кГц	Работа систем без предыскажения уровней												Предыскажение 4 дБ							
		При преобладании в трактах систем продуктов нелинейности указанных ниже порядков																			
		2-й порядок				3-й порядок				4-й порядок				2-й порядок				3-й порядок			
		Фильтры «А»		Фильтры «В»		Фильтры «А»		Фильтры «В»		Фильтры «А»		Фильтры «В»		Фильтры «А»		Фильтры «В»		Фильтры «А»		Фильтры «В»	
		ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ	ПОМ	ППМ
12	12—60	2,7	—	1,6	—	—0,8	—5,0	—0,5	—2,9	4,8	—0,7	2,7	—0,4	2,7	—	1,6	—	—5,4	—9,5	—3,4	—5,8
24	12—108	1,7	—0,4	0,8	—	—0,3	—3,3	—0,1	—1,3	3,1	—0,9	1,3	—0,2	1,5	—0,5	0,8	—	—4,0	—7,1	—1,7	—2,8
36	12—156	1,3	—1,2			—0,4	—4,1			3,2	—1,8			0,9	—1,5			—4,6	—8,4		
48	12—204	0,9	—0,9			—0,2	—3,0			2,4	—1,4			0,8	—1,1			—3,6	—6,4		
60	12—252	0,7	—0,3	0,4	—	—0,1	—1,6	—	—0,6	1,4	—0,6	0,6	—0,1	0,7	—0,3	0,4	—	—2,1	—3,6	—0,8	—1,4
60	60—300	1,6	—	0,6	—	—0,5	—2,9	—0,2	—1,1	2,8	—0,4	1,0	—0,2	1,6	—	0,6	—	—3,5	—5,9	—1,4	—2,3
72	12—300	0,6	—0,7	0,5	—	—0,1	—2,1	—	—0,8	1,7	—1,0	0,8	—0,2	0,5	—0,8	0,5	—	—2,7	—4,7	—1,1	—1,9
96	12—408			0,4	—0,1			—	—0,8			0,7	—0,3			0,4	—0,1			—1,1	—1,8
120	60—552	1,2	—	0,5	—	—0,2	—1,9	—0,1	—0,9	2,0	—0,4	0,9	—0,2	1,2	—	0,5	—	—2,5	—4,3	—1,3	—2,1
132	12—552			0,3	—0,2			—	—0,8			0,7	—0,3			0,3	—0,2			—1,1	—1,8
192	12—804			0,2	—0,2			—	—0,7			0,6	—0,4			0,2	—0,3			—1,0	—1,8
252	12—1052	0,2	—0,8	0,2	—0,3	—	—1,5	—	—0,7	1,0	—1,0	0,5	—0,4	0,1	—0,9	0,2	—0,3	—2,0	—3,6	—1,0	—1,7
300	60—1300	0,7	—0,4	0,5	—	—0,1	—1,6	—	—0,8	1,4	—0,7	0,8	—0,2	0,6	—0,4	0,5	—	—2,2	—3,8	—1,1	—1,9
432	12—1796			0,1	—0,4			—	—0,7			0,5	—0,5			0,1	—0,4			—1,1	—1,8
600	60—2600	0,4	—0,4	0,3	—0,1	—0,1	—1,3	—	—0,6	1,0	—0,6	0,6	—0,2	0,3	—0,5	0,3	—0,1	—1,7	—2,9	—0,9	—1,6
612	12—2600			0,1	—0,3			—	—0,6			0,4	—0,4			0,1	—0,3			—0,9	—1,5
792	12—3284			0,1	—0,4			—	—0,7			0,4	—0,5			—	—0,4			—1,0	—1,7
900	316—4100	0,9	—0,1	0,1	—	—0,1	—1,6	—	—0,1	1,6	—0,4	0,1	—	0,9	—0,1	0,1	—	—2,2	—3,7	—0,1	—0,2
960	60—4100	0,2	—0,7	0,1	—	—0,1	—1,4	—	—0,1	1,0	—0,8	0,1	—	0,2	—0,7	0,1	—	—1,9	—3,3	—0,1	—0,2
972	12—4100			—	—			—	—0,1			0,1	—			—	—			—0,1	—0,2
1200	316—5600	0,7	—0,1	—	—	—0,1	—1,3	—	—0,1	1,3	—0,4	0,1	—	0,7	—0,1	—	—	—1,9	—3,2	—0,1	—0,2
1260	60—5600	0,2	—0,6	—	—	—	—1,3	—	—0,1	0,9	—0,8	0,1	—	0,1	—0,7	—	—	—1,7	—3,0	—0,1	—0,2
1800	316—8160	0,6	—0,6	—	—	—0,1	—1,9	—	—0,1	1,5	—0,9	0,1	—	0,5	—0,7	—	—	—2,4	—4,2	—0,1	—0,1
1872	12—8160			—	—			—	—0,1			—	—			—	—			—0,1	—0,1
2700	316—12360	0,4	—0,8	—	—	—0,1	—2,0	—	—	1,4	—1,0	—	—	0,3	—0,9	—	—	—2,5	—4,4	—0,1	—0,1

Сокращения аналогичны использованным в табл. 9.6.1.

тах, предшествующих данной, считалось, что погрешность является функцией только переменной «*a*». Введение переменной *b* исключило возможность построения зависимости погрешности от переменной *a* и вызвало необходимость разработки табл. 9.6.1 и 9.6.2. Приведенные в таблицах данные рассчитаны для 25 систем с различной типовой емкостью, причем использовались реальные значения параметров *a* и *b*. Для каждого из этих спектров были рассмотрены фильтры как типа «А», так и типа «В» для верхнего и нижнего измерительных каналов. Сложность вывода соотношений при разных значениях третьей переменной (порядка нелинейных искажений γ) не позволила в данной работе провести расчет для измерительных каналов в средней части спектра сигнала шума. Поскольку большинство систем работает с предыскажением, наибольший интерес представляет верхний измерительный канал.

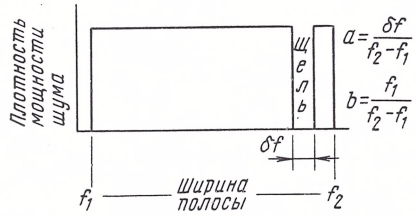


Рис. 9.6.1. Коэффициенты ширины щели *a* и ширины спектра частот измеряемого тракта *b*

Необходимо подчеркнуть, что данные таблиц относятся к той зоне кривой помехозащищенности, где преобладают нелинейные искажения. В линейной зоне кривой помехозащищенности последняя определяется только собственными помехами, а погрешность измерения не зависит от ширины щели.

9.7. Влияние АРУ

Большинство современных передатчиков сигнала шума снабжено автоматической регулировкой усиления (АРУ), которая поддерживает постоянную мощность сигнала шума на выходе передатчика при переключении полосно-заграждающих фильтров. В результате действия АРУ компенсируется снижение мощности сигнала шума на выходе передатчика, возникающее из-за затухания фильтров в полосе задержания и затухания сигнала шума в выравнивателе этого фильтра. Выравниватели необходимы во многих полосно-заграждающих фильтрах типа «В» для того, чтобы достичь очень малой неравномерности АЧХ, заданной последними рекомендациями.

Таким образом АРУ поддерживает постоянной общую мощность сигнала шума. Следовательно, при включении полосно-заграждающего фильтра в результате действия АРУ плотность мощности сигнала шума на выходе передатчика увеличивается. При этом может быть компенсировано снижение уровня нелинейных продуктов, вызванное включением полосно-заграждающего фильтра, поскольку уровни мощности всех других составляющих сигнала шума возрастают.

На рис. 9.7.1 показано, что имеется в виду в случае поддержания постоянного уровня составляющих сигнала шума (т. е. постоянной плотности мощности ППМ) и в случае поддержания постоянной общей мощности ПОМ.

В табл. 9.6.1 и 9.6.2 приведены поправки, которые необходимо вносить в случае поддержания постоянной плотности мощности или постоянной общей мощности. Из таблиц можно видеть, что при преобладании в тракте измеряемой системы продуктов нелинейности 3-го порядка ошибка измерения помехозащищенности минимальна в случае поддержания постоянной общей мощности.

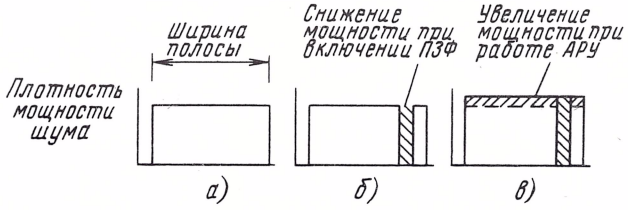


Рис. 9.7.1. Постоянная плотность мощности и постоянная общая мощность. Работа АРУ поддерживает при включении ПЗФ (в варианте С) такую же общую мощность сигнала шума, которая была до включения ПЗФ (варианта *а*):

а) полосно-заграждающий фильтр (ПЗФ) выключен; *б*) постоянная плотность мощности: включен ПЗФ, но плотность мощности не изменилась, т. е. такая же, как в варианте *а*; *в*) постоянная общая мощность; включен ПЗФ и при равенстве заштрихованных площадей плотность мощности сигнала шума выше, чем в вариантах *а* и *б*

Иными словами, АРУ автоматически обеспечивает наилучшую точность. При преобладании продуктов нелинейности 2-го порядка обычное использование АРУ (поддерживающей постоянство общей мощности) обеспечивает большую точность в нижнем измерительном канале и меньшую точность в верхнем измерительном канале спектра трактов систем без предыскажения. При работе систем с предыскажением, хотя при поддержании постоянной плотности мощности погрешность в нижнем измерительном канале меньше, обычное использование АРУ обеспечивает погрешность не более 0,2 дБ при числе каналов больше 120 и не более 0,1 дБ при числе каналов больше 300. Для верхнего измерительного канала также нет преимущества при переходе на поддержание постоянной плотности мощности. В нижнем измерительном канале систем с преобладанием нелинейности 4-го порядка величина погрешности примерно такая же, и, поскольку она не превышает 0,2 дБ при числе каналов более 120 и 0,1 дБ при числе каналов более 300, рекомендуется и в этом случае использовать обычное включение АРУ. Судя по погрешностям в верхнем измерительном канале, в этом случае было бы предпочтительнее уменьшать общий уровень мощности сигнала шума после включения фильтра на величину затухания этого фильтра в полосе задерживания, т. е. поддерживать постоянную плотность мощности. Однако необходимо отметить, что при использовании фильтров типа «В» в систе-

мах с числом каналов выше 900 погрешность при обычном включении АРУ не превышает 0,1 дБ, поэтому переход на поддержание постоянной плотности мощности не является необходимым.

Учитывая все эти соображения, можно сделать вывод, что поддержание при помощи АРУ постоянной общей мощности во многих случаях обеспечивает более высокую точность измерений. Поэтому рекомендуется в большинстве случаев обычное включение АРУ. В тех особых случаях, когда требуется более высокая точность измерений и она может быть получена путем поддержания постоянной плотности мощности, уровень мощности можно уменьшить на величину затухания фильтра в полосе задерживания.

9.8. Влияние предыскажения

На рис. 9.8.1 показана характеристика предыскажающего контура, рекомендованного МККР. В нижней части диапазона уровень сигнала понижается на 4 дБ, а в верхней части диапазона повышается на 4 дБ. Точка нулевого затухания предыскажающего контура расположена на расстоянии примерно 60% от начала поло-

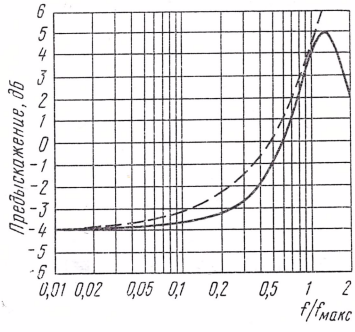


Рис. 9.8.1. Кривая предыскажения уровней передачи линейных трактов многоканальных систем передачи. Рекомендация 275-1 МККР и ее экспоненциальная аппроксимация:

- - - - $e^{k\frac{f}{f_{макс}}} \rightarrow \left(8\frac{f}{f_{макс}} - 4\right)$ дБ (k=1,842);

——— кривая предыскажения;

Рекомендация 275-1 МККР

$$\left(5 - 10\lg\left\{1 + \frac{6{,}90}{1 + \frac{5{,}25}{\left(\frac{5f_{макс}}{4f} - \frac{4f}{5f_{макс}}\right)^2}}\right\}\right)$$

сы. Использование в расчетах точного аналитического выражения этой кривой чрезвычайно усложнило бы вычисление погрешности за счет ширины щели в системе с предыскажением. Поэтому при расчете погрешности за счет ширины щели использовалось более простое аппроксимирующее выражение. Аналитическое выражение аппроксимированной кривой представляет собой экспоненту $k\,(f/f_{макс})$. При $k = 1{,}842$ аппроксимированная характеристика совпадает с кривой МККР на крайних частотах диапазона, но отклоняется от нее на 1 дБ в середине диапазона. Эта аппроксимация была использована в другой работе для анализа систем с предыскажением уровней. Результаты расчетов оказались близкими к наблюдаемым на практике. Аппроксимированная характеристика также приведена на рис. 9.8.1.

9.9. Поправки к значению помехозащищенности, компенсирующие погрешность из-за влияния ширины щели на результаты измерений

В табл. 9.6.1 и в табл. 9.6.2 приведены поправки для нижнего и верхнего измерительных каналов соответственно. В каждой из таблиц поправки даются как для случая работы систем без предыскажения уровней передачи, так и для случая работы систем с предыскажением. Указанные поправки в обеих таблицах приведены для фильтров типов «А» и «В» при постоянной общей мощности (обычная работа АРУ) и постоянной плотности мощности при преобладающей нелинейности 2 и 3-го порядков. При преобладающей нелинейности 4-го порядка поправки приведены только для случая работы без предыскажения. Значения поправок рассчитаны с учетом частотных диапазонов линейных трактов наиболее часто используемых многоканальных систем и округлены до 0,1 дБ. Прочерк означает, что погрешность не превышает 0,05 дБ, а незаполненная графа говорит о том, что для систем данной емкости фильтры не существуют. Поправки должны прибавляться к измеренному значению помехозащищенности. Сравнение данных для фильтров типов «А» и «В» показывает, что при использовании более узкополосных фильтров типа «В» получают и более точные результаты измерений. Кроме того, подтверждается необходимость включения одновременно только одного полосно-заграждающего фильтра. Например, поправка для верхнего измерительного канала в случае измерения линейного тракта системы емкостью 2700 каналов ТЧ с предыскажением при использовании фильтра типа «В» и преобладании нелинейности 3-го порядка составляет всего —0,1 дБ, в то время как при использовании фильтра типа «А» даже при включении АРУ поправка составляет —2,5 дБ (т. е. погрешность равна 2,5 дБ).

9.10. Нелинейные искажения более высоких порядков

Приведенные выше общие решения для расчета погрешности из-за влияния ширины щели ограничены нелинейными искажениями только 2 и 3-го порядков в системах с предыскажением и 4-го порядка в системах без предыскажения. Был произведен приблизительный расчет погрешности при преобладании нелинейных искажений 5 и 6-го порядков для частного условного случая, когда ширина верхних измерительных каналов составляла 10% от общей ширины спектра ($a=0{,}1$), система работала без предыскажения и спектр начинался от постоянного тока ($b=0$). Результаты расчета показывают, что при наличии нелинейности только одного

порядка γ и поддержания постоянной плотности мощности погрешность может быть определена по формуле

$$\text{погрешность из-за нелинейности } \gamma\text{-го порядка} = -10 \lg \left(\frac{1}{1-a}\right)^{\gamma}, \text{ дБ.} \quad (11)$$

Поскольку это значение точно совпадает с увеличением нелинейности порядка γ при действии обычной АРУ (постоянная общая мощность), может показаться, что АРУ обеспечит пренебрежимо малую погрешность, как это происходит в системах с преобладанием нелинейности 3-го порядка. К сожалению, в системе, имеющей нелинейность порядка γ, возникают также продукты нелинейных искажений порядка $(\gamma-2)$, $(\gamma-4)$ и т. д. Например, если в системе имеется нелинейность 6-го порядка, то в ней также имеются нелинейности 4 и 2-го порядков. Приемник измеряет общие результирующие искажения. Поэтому в рассматриваемом случае общее расчетное выражение погрешности измерений оказывается значительно более сложным. Наиболее приемлемое правило, которое рекомендуется в настоящее время для учета погрешности измерений, может быть выражено следующим образом.

При преобладании продуктов нелинейности четных порядков (6-го и выше) следует брать среднее из значений помехозащищенности, полученных при постоянной общей мощности и постоянной плотности мощности. При преобладании продуктов нелинейности нечетных порядков (5-го и выше) следует брать значение помехозащищенности при обычной работе АРУ (постоянная общая мощность).

Чем выше порядок преобладающей нелинейности, тем большее влияние на погрешность измерений может оказать ширина щели. Очевидный путь уменьшения погрешности — применение самых узкополосных фильтров (типа «В»).

9.11. Точность измерения помехозащищенности с учетом влияния всех рассмотренных факторов

Учитывая все рассмотренные факторы, влияющие на точность измерений, можно получить следующие выражения для расчета погрешности при измерениях помехозащищенности «e_n»:

Линейная зона:

$$e_n = \pm \sqrt{e_g^2 + e_r^2}. \quad (12)$$

Нелинейная зона:

$$e_n = \pm \sqrt{e_g^2 + e_r^2} + e_s, \quad (13)$$

где e_s — поправка, учитывающая влияние ширины щели, из табл. 9.6.1 и 9.6.2, а e_g и e_r рассмотрены в § 9.4 и 9.5.

С учетом (7) — (10) из (12) и (13) получаем:

Линейная зона:

$$e_n = \pm \sqrt{e_{ag}^2 + e_{mg}^2 + e_f^2 + e_{ar}^2 + e_{mr}^2}. \quad (14)$$

Нелинейная зона:

$$e_n = \pm \sqrt{(\gamma - 1)^2 (e_{ag}^2 + e_{mg}^2) + e_f^2 + e_{ar}^2 + e_{mr}^2} + e_s. \quad (15)$$

Например, для системы емкостью 1800 каналов ТЧ при уровне передачи — 20 дБм и измеренном значении помехозащищенности 60 дБ погрешность измерения может быть вычислена для случая включения фильтров типов «А» и «В» в верхнем измерительном канале следующим образом. Значения e_g и e_r берутся из описаний установок для измерений белым шумом типов 0А 2090А и 0А 2090В фирмы «Marconi Instruments» (см. § 10.2 и 10.3). Предположим, что система работает с предыскажением и в ней преобладает нелинейность 3-го порядка ($\gamma=3$). Для рассматриваемого случая погрешности, вносимые передатчиком и приемником указанных установок, составляют:

	ОА 2090А	ОА 2090В
Погрешность аттенюатора передатчика e_{ag}, дБ . .	±0,4	±0,2
Погрешность индикатора передатчика e_{mg}, дБ .	±1,0	±0,3
Неравномерность спектральной плотности шума e_f, дБ	±0,5	±0,5
Погрешность аттенюатора приемника e_{ar}, дБ . .	±0,7	±0,4
Погрешность индикатора приемника e_{mr}, дБ . .	0	0

Погрешности за счет ширины щели (при перечисленных выше условиях и обычной работе АРУ, т. е. при поддержании постоянной общей мощности шума):

для оборудования типа «А» $e_s = -2{,}4$ дБ;

для оборудования типа «В» $e_s = -0{,}1$ дБ.

Подставляя указанные значения в выражения (14) и (15), получаем:

Линейная зона:

для оборудования типа «А» $e_n = \pm 1{,}4$ дБ;

для оборудования типа «В» $e_n = \pm 0{,}7$ дБ.

Нелинейная зона:

для оборудования типа «А» $e_n = -2{,}4 \pm 2{,}3$ дБ;

для оборудования типа «В» $e_n = -0{,}1 \pm 1{,}0$ дБ.

Таким образом, наглядно доказано повышение точности измерений при использовании оборудования типа «В».

В Рекомендации G228 МККТТ указано, что в тех случаях, когда требуется более высокая точность измерений, передатчик должен быть отградуирован на отметке 0 дБ при помощи стандартного измерителя мощности. При этом исключается погрешность за счет индикатора передатчика, которая в ф-лу (15) входит с коэффициентом $(\gamma - 1)$. Поэтому при преобладании нели-

нейности высоких порядков следует ожидать значительного улучшения точности.

Исключив из выражений (14) и (15) значение e_{mg}, получаем для рассматриваемого примера следующие погрешности:

Линейная зона:

для оборудования типа «А» $e_n = \pm 0{,}9$ дБ;
для оборудования типа «В» $e_n = \pm 0{,}6$ дБ.

Нелинейная зона:

для оборудования типа «А» $e_n = e_s \pm 1{,}2$ дБ;
для оборудования типа «В» $e_n = e_s \pm 0{,}8$ дБ.

Таким образом, погрешность при использовании оборудования типа «А» уменьшается на 0,5 дБ в линейной зоне и на 1,1 дБ в нелинейной зоне. Снижение погрешности для оборудования типа «В» составляет 0,1 и 0,2 дБ соответственно. При использовании оборудования типа «В» получается меньший эффект, поскольку индикатор уровня выходной мощности передатчика в оборудовании этого типа имеет значительно более высокую точность.

Перечисленные в этой главе факторы, влияющие на точность измерения помехозащищенности, не исключают необходимости коррекции результатов измерений, если измеренное значение близко к значению собственной помехозащищенности измерительного комплекта. В этом случае, кроме описанных выше поправок, к значениям помехозащищенности должны быть прибавлены поправки из § 7.7 и рис. 7.7.1.

Глава 10 Установки для измерения при загрузке белым шумом и фильтры фирмы «Marconi Instruments»

10.1. Модели 0А 1249 и 0А 2090

Первая установка для измерения белым шумом типа 0А 1249 фирмы «Marconi Instruments» появилась в 1958 г. Передатчик этой установки генерировал шум в полосе до 4 МГц, поэтому она была пригодна для испытания линейных трактов систем емкостью до 600 каналов. В течение нескольких лет ширина спектра сигнала шума была расширена, что обеспечило измерение трактов систем емкостью сначала до 960, а в дальнейшем до 1200 каналов ТЧ.

В 1964 г. вместо этой установки начала выпускаться установка типа 0А 2090 — первая установка для измерения с загрузкой трак-

тов систем белым шумом емкостью до 2700 каналов ТЧ. Установка 0А 2090, выполненная в соответствии с Рекомендациями 399 МККР (Женева, 1963 г.), до сих пор применяется во многих странах.

10.2. Установка типа 0А 2090А для измерения трактов при загрузке белым шумом

Приемник типа (TF 2092) установки 0А 2090 был отградуирован только в значениях помехозащищенности. Для измерений в полосе частот тракта в абсолютных единицах, а также для подключения внешнего самописца при измерениях помех вне полосы частот тракта измеряемой системы требовался внешний калибровочный источник сигнала шума. Для облегчения измерений этих видов в приемник типа TF 2092 был введен встроенный широкополосный калибровочный источник шума мощностью 1 пВт. Приемнику с калибровочным источником шума присвоена марка TF 2092А. Этот новый приемник, выпущенный в 1967 г., был отградуирован как в значениях помехозащищенности (т. е. в децибелах), так и в пВт/канал.

С появлением приемника TF 2092А вся установка получила название 0А 2090А и благодаря большому набору фильтров типа «А» положила начало термину «оборудование типа А». По внешнему виду установка 0А 2090А очень похожа на установку 0А 2090В (см. следующий параграф). Однако электрические параметры установки 0А 2090А соответствуют рекомендации 399 МККР, но не полностью соответствуют требованиям Рекомендации 399-1 МККР (Осло, 1966 г.). Несмотря на то что установка 0А 2090А может работать с набором фильтров типа «В», она в этом случае все же не полностью соответствует рекомендациям для оборудования типа «В». Существенные отличия характеристик установки 0А 2090А и следующей за ней установки 0А 2090В описаны в следующем параграфе.

10.3. Установка типа 0А 2090В для измерений трактов при загрузке белым шумом

В § 8.5 рассмотрены основные различия между рекомендациями для оборудования типов «А» и «В». Введение рекомендаций для оборудования типа «В» (Рекомендация 399-1 МККР) потребовало определенного улучшения характеристик основных составных частей измерительной аппаратуры, а также разработки ряда совершенно новых фильтров типа «В». Поэтому в 1970 г. была выпущена измерительная установка (оборудование, аппаратура) типа 0А 2090В, соответствующая Рекомендациям 399-1 МККР. Поскольку ожидалось, что некоторые ведомства еще в течение нескольких лет продолжат измерения с загрузкой трактов белым

Таблица 10.3.1. **Краткие характеристики установок ОА 2090А и ОА 2090В**

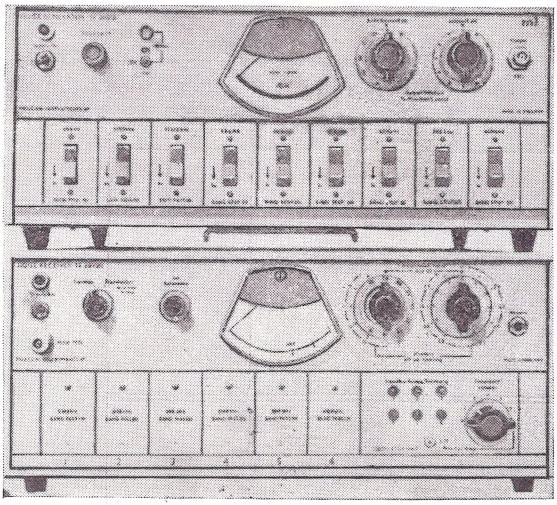
Тип генератора	TF 2091	TF 2091B	Тип приемника	TF 2092A	TF 2092B
1	2	3	4	5	6
Генерируемый сигнал шума:			Входное сопротивление	75 Ом	75 Ом
ширина полосы	Не менее чем от 12 до 12 388 кГц	Не менее чем от 12 до 12 360 кГц			
неравномерность плотности мощности	В пределах 1 дБ	±0,5 дБ	Аттенюатор отсчета помехозащищенности:		
уровень максимальной общей мощности	+20 дБм	+20 дБм	диапазон	111 дБ ступенями по 1 дБ	91 дБ ступенями по 1 дБ
максимальная плотность мощности	—15 дБм/кГц	—14,5 дБм/кГц с фильтрами типа «В»; —12,5 дБм/кГц с фильтрами типа «А»	точность	1% ±1 дБ	0,5% ±1 дБ
пик-фактор	—	>12 дБ вплоть до +17 дБм	Чувствительность	—115 дБм/кГц	—130 дБм/кГц с фильтрами типа «В»; —120 дБм/кГц с фильтрами типа «А»
АРУ	—	+0÷—0,25 дБ	Эффективная ширина полосы пропускания	1 кГц	2,2 кГц
Точность установки уровня	±1 дБ или ±2 дБ (в зависимости от уровня)	±0,3 дБ на отметке 0 дБм	Количество измерительных каналов	6	6
Выходной аттенюатор:			Источник калибровочного сигнала шума:		
диапазон	51 дБ ступенями по 1 дБ	71 дБ ступенями по 1 дБ	мощность и ее точность	1 пВт/канал (±0,5 дБ)	1 пВт/канал (±0,5 дБ)
точность	1% ±0,1 дБ	0,5% ±0,1 дБ	неравномерность плотности мощности	±0,25 дБ	±0,25 дБ

Продолжение табл. 10.3.1

1	2	3	4	5	6
Количество фильтров	9 (верхних частот + + нижних частот + + полосно-заграждающих)	9 (верхних частот + + нижних частот + + полосно-заграждающих)			
Выходное сопротивление	75 Ом	75 Ом	Размеры: высота ширина глубина	$7^3/_4$ дюйма (19,5 см) $18^3/_4$ дюйма (47,5 см) 17 дюймов (43,2 см)	**$7^3/_4$ дюйма (19,5 см)** **$18^3/_4$ дюйма (47,5 см)** **17 дюймов (43,2 см)**
Размеры: высота ширина глубина	$7^3/_4$ дюйма (19,5 см) $18^3/_4$ дюйма (47,5 см) 17 дюймов (43,2 см)	$7^3/_4$ дюйма (19,5 см) $18^3/_4$ дюйма (47,5 см) **17 дюймов (43,2 см)**			
Вес: основной блок типичный фильтр	26 фунтов[30] (11,8 кг) 1 фунт 2 унции [30] (480 г)	$26^1/_2$ фунта (12 кг) $1^1/_4$ фунта (600 г)	Вес: основной блок типичный фильтр	25 фунтов (11,4 кг) 1 фунт 2 унции (480 г)	27 фунтов (12,3 кг) $1^1/_4$ фунта (600 г)

[30] 1 фунт (торгового веса) = 453,6 г.
1 унция = 28,35 г.

шумом по рекомендации оборудования типа «А», была предусмотрена возможность совместной работы аппаратуры 0А 2090В с фильтрами типа «А». Кроме того, конструкция фильтров типа «В» обеспечивает взаимозаменяемость их с фильтрами типа «А». Таким образом, обеспечена возможность использования фильтров типа «А» при измерениях с основным оборудованием типа «В» и наоборот. Однако, как показано в § 9.11, точность измерения существенно зависит от выбранной аппаратуры.



Установка для измерения трактов связи при загрузке сигналом белого шума типа 0А 2090В. Установка рассчитана для измерений трактов емкостью до 2700 каналов ТЧ, ее параметры соответствуют Рекомендации 399-1 МККР

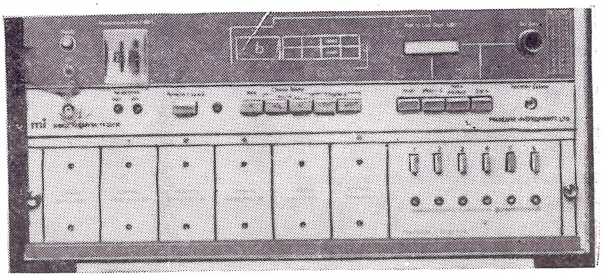
Характеристики аппаратуры типа 0А 2090В улучшены по сравнению с характеристиками аппаратуры 0А 2090А в нескольких направлениях. Требования к аппаратуре этих типов приведены в табл. 10.3.1, а ниже указаны существенные отличия:

	ОА 2090А	ОА 2090В
Точность индикатора мощности, дБ	±1 или ±2	±0,3
Погрешность аттенюаторов приемника и передатчика, %	1	0,5
АРУ, дБ	не предусмотрено	+0 —0,25
Чувствительность приемника, дБм/кГц	—115	—130

Влияние этих улучшений на точность измерений показано на примере в § 9.11.

10.4. Автоматизированный приемник сигнала шума типа TF 2092C

В 1974 г. было объявлено о разработке приемника этого типа, являющегося модернизированным вариантом приемника типа TF 2092B. Приемник TF 2092C обеспечивает автоматический цифровой отсчет измеряемого значения помехозащищенности и измерительного уровня мощности в канале во всех употребляемых единицах передачи, включая дБм0, дБм0п, dBrnC0 и отношение сигнал/помеха. Он допускает включение всех фильтров типов «А» и «В», которые с целью облегчения изменения количества измерительных каналов размещены во встроенных блоках.



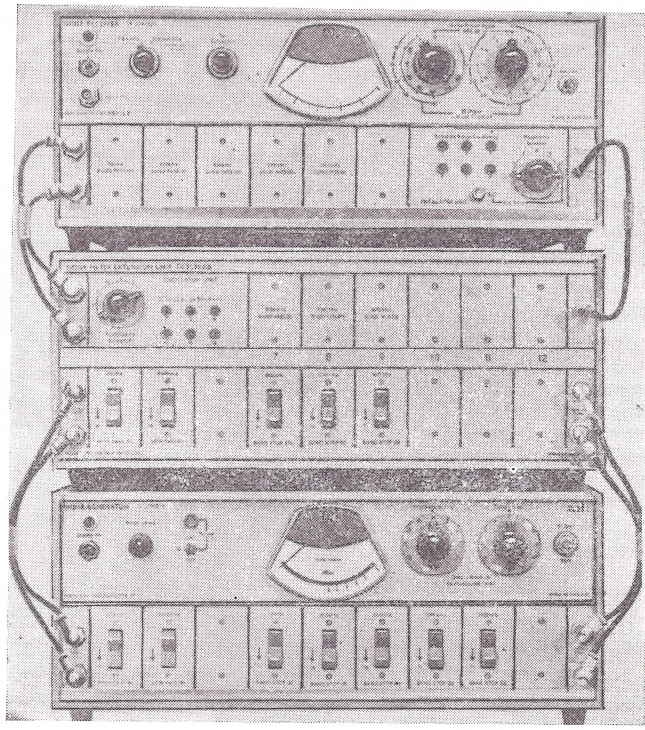
Автоматизированный приемник сигнала шума типа TF 2092C. Приемник обеспечивает цифровую индикацию значений помехозащищенности, а также уровней мощности шума и помех в дБм0п, dBrnC0 и других единицах

Выпускаемые в настоящее время передатчики сигнала шума могут работать совместно с приемником TF 2092C. Однако при этом нельзя полностью использовать возможности, предусмотренные в приемнике TF 2092C. Например, пока не будет введена соответствующая автоматизация управления работой передатчика, не представляется возможным включить TF 2092C в состав автоматической измерительной или управляющей системы, работающей по программе. В недалеком будущем ожидается выпуск автоматизированного передатчика, предназначенного для совместной работы с этим приемником в полностью автоматическом режиме работы. Электрические параметры приемника TF 2092C в основном подобны параметрам приемника TF 2092B.

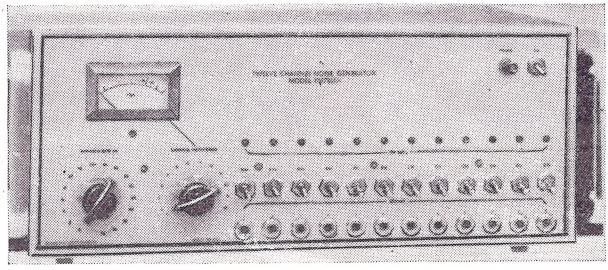
10.5. Дополнительный блок ТК 2099АВ

Обычно полный комплект установки серии 0А 2090 для измерения трактов при загрузке белым шумом содержит 3 или 4 фильтра, ограничивающих полосу частот сигнала шума и 5 или 6 комплектов фильтров измерительных каналов. Как показала практика, для подавляющего большинства измерений этого количества фильтров достаточно. Однако в некоторых случаях, в частности при измерениях трактов связей через спутники и при производстве аппаратуры, может оказаться необходимым расширить обычный комплект фильтров. Для исключения необходимости замены фильт-

ров был разработан дополнительный блок ТК 2099АВ. Это устройство удваивает возможности установки, обеспечивая подключение до 12 измерительных каналов и до 6 формирующих полосу



Дополнительный блок ТК 2099АВ, размещенный между передатчиком сигнала шума (внизу) и приемником сигнала шума (вверху), позволяет удвоить число измерительных каналов установки для измерений трактов при загрузке белым шумом



Двенадцатиканальный генератор сигнала шума типа ТМ 7816А. Он содержит 12 отдельных источников сигнала шума для загрузки систем малой емкости и каналопреобразующего оборудования

частот шума фильтров. Блок ТК 2099АВ пригоден для работы со всеми установками серии 0А 2090 после простой модификации приемника и передатчика. С этой целью фирмой предусмотрен комплект деталей для модификации.

10.6.
Двенадцатиканальный генератор сигнала шума типа ТМ 7816А

В § 7.6 говорилось о методе измерений при загрузке шумом индивидуального преобразовательного оборудования и малоканальных систем. Для таких измерений выпускается 12-канальный генератор сигнала шума типа ТМ 7816А, содержащий 12 отдельных некоррелированных источников сигнала шума. Каждый источник генерирует сигнал шума со спектром от 300 до 3400 Гц; уровень сигнала шума на выходе регулируется от —32 до 0 дБм.

10.7.
Фильтры на стандартные частоты

Хотя действующие рекомендации предусматривают фильтры типа «В», еще существует потребность в фильтрах типа «А». Таким образом, в производстве имеется три вида основных фильтров. В табл. 10.7.1 перечислены фильтры типа «А» по Рекомендации 399 МККР. Их характеристики приведены на рис. 8.1.1 и 8.1.2. В табл. 10.7.2 перечислены фильтры типа «В» по Рекомендации 399-1, характеристики которых показаны на рис. 8.3.1 и 8.3.2. Реализованные полосы полосно-заграждающих фильтров по пяти

Таблица 10.7.1. **Выпускаемые фирмой «Marconi Instruments» фильтры типа «А» (Рекомендация 399 МККР, Женева, 1963 г.)**

	Частота среза, кГц	Тип фильтра	Средняя частота измерительного канала, кГц	Тип фильтра или гетеродина		
				ПЗФ	полосовой фильтр	гетеродин
ФНЧ	60	ТМ 7720/8	14	ТМ 7729	ТМ 7730	ТМ 7793
	108	ТМ 7720	27	ТМ 7729/21	ТМ 7730/21	ТМ 7793/4
	156	ТМ 7720/14	34	ТМ 7729/12	ТМ 7730/12	ТМ 7793/2
	204	ТМ 7720/10	40	ТМ 7729/1	ТМ 7730/1	ТМ 7793/1
	252	ТМ 7720/15	56	ТМ 7729/13	ТМ 7730/13	ТМ 7793/3
	300	ТМ 7720/1	70	ТМ 7729/2	ТМ 7730/2	ТМ 7794
	552	ТМ 7720/2	105	ТМ 7729/3	ТМ 7730/3	ТМ 7794/1
	1 052	ТМ 7720/11	185	ТМ 7729/4	ТМ 7730/4	ТМ 7794/2
	1 300	ТМ 7720/3	245	ТМ 7729/22	ТМ 7730/22	ТМ 7794/9
	2 660	ТМ 7720/12	270	ТМ 7729/5	ТМ 7730/5	ТМ 7794/3
	4 028	ТМ 7720/5	342	ТМ 7729/16	ТМ 7730/16	ТМ 7794/6
	4 188	ТМ 7720/13	534	ТМ 7729/6	ТМ 7730/6	ТМ 7794/4
	5 564	ТМ 7720/9	1 002	ТМ 7729/15	ТМ 7730/15	ТМ 7795/5
	8 204	ТМ 7720/6	1 248	ТМ 7729/7	ТМ 7730/7	ТМ 7795
	12 388	ТМ 7720/7	2 438	ТМ 7729/8	ТМ 7730/8	ТМ 7795/1
ФДЧ	12	ТМ 7728	3 886	ТМ 7729/9	ТМ 7730/9	ТМ 7795/2
	60	ТМ 7728/1	5 340	ТМ 7729/17	ТМ 7730/17	ТМ 7795/6
	316	ТМ 7728/2	8 002	ТМ 7729/10	ТМ 7730/10	ТМ 7795/3
			12 150	ТМ 7729/11	ТМ7730/11	ТМ 7795/4

уровням затухания указаны в табл. 8.3.2* и 8.4.2 для фильтров МККР и «Intelsat IV» соответственно. Следует отметить, что в табл. 10.7.1 и 10.7.2 указаны три дополнительных фильтра на частоты 40,56 и 185 кГц. Они выполнены «в духе» Рекомендации 399-1 МККР. Параметры первых двух аналогичны параметрам фильтра на 98 кГц, а параметры фильтра на 185 кГц идентичны параметрам фильтра на 240 кГц (см. табл. 8.4.2). В табл. 10.7.3 перечислены фильтры для измерения вне полосы согласно Рекомендации 398-2 МККР, а их характеристики указаны в § 8.7.

Таблица 10.7.2. **Выпускаемые фирмой «Marconi Instruments» фильтры типа «В» (Рекомендация 399-1 МККР, Осло, 1966 г.)**

	Частота среза, кГц	Тип фильтра	Средняя частота измерительного канала, кГц	Тип комплекта[o]
ФНЧ	108*,×	ТК 2095/8	16*,×	ТК 2094/9
	156*	ТК 2095/18	40	ТК 2094/10
	252*,×	ТК 2095/9	56	ТК 2094/11
	300*,+	ТК 2095	70*,+	ТК 2094
	408*	ТК 2095/12	98*,×	ТК 2094/12
	552*,+	ТК 2095/1	140*	ТК 2094/26
	804*	ТК 2095/13	185	ТК 2094/14
	1 052*	ТК 2095/14	240*,×	ТК 2094/15
	1 296*,+	ТК 2095/2	270+	ТК 2094/1
	1 796*	ТК 2095/10	394*	ТК 2094/16
	2 600*,+	ТК 2095/3	534*,+	ТК 2094/2
	3 284*	ТК 2095/11	770*	ТК 2094/19
	4 100*,+	ТК 2095/4	1 002*	ТК 2094/20
	4 892*	ТК 2095/19	1 248+	ТК 2094/3
	5 600+	ТК 2095/5	1 730*	ТК 2094/17
	8 160*,+	ТК 2095/6	2 438*,+	ТК 2094/4
	12 360*	ТК 2095/7	3 150*	ТК 2094/18
ФВЧ	12*,×	ТК 2096/2	3 886*,+	ТК 2094/5
	60+	ТК 2096	4 650*	ТК 2094/27
	316+	ТК 2096/1	5 340*,+	ТК 2094/6
			7 600*,+	ТК 2094/7
			11 700+	ТК 2094/8

[o] Каждый комплект формирования измерительного канала серии ТК 2094 состоит из полосно-заграждающего фильтра для передатчика TF 2091B, полосового фильтра и гетеродина для приемника TF 2092B.

* INTELSAT SSOG, т. II, июнь, 1971 г.

+) Рекомендация 399-1 МККР (Осло, 1966 г.).

×) МККТТ, Вопрос 8/C, приложение 1 (Мар-Дель-Плата, 1968 г.).

* Для измерительного канала со средней частотой 3886 кГц выпускается кристаллический фильтр.

Таблица 10.7.3. **Выпускаемые фирмой «Marconi Instruments» комплекты формирования измерительных каналов при измерениях вне полосы частот тракта-измерения с реальной загрузкой (Рекомендация 398-2 МККР, Нью-Дели, 1970 г.)**

Средняя частота измерительного канала, кГц	Тип комплекта (в состав каждого комплекта входит ПЗФ, полосовой фильтр и гетеродин)	Средняя частота измерительного канала, кГц	Тип комплекта (в состав каждого комплекта входит ПЗФ, полосовой фильтр и гетеродин)
10	ТК 2084	3 200	ТК 2084/10
50	ТК 2084/1	3 250	ТК 2084/11
119	ТК 2084/2	4 715	ТК 2084/12
270	ТК 2084/3	4 765	ТК 2084/13
304	ТК 2084/4	6 199	ТК 2084/14
331	ТК 2084/5	6 300	ТК 2084/15
600	ТК 2084/6	9 023	ТК 2084/16
607	ТК 2084/7	9 073	ТК 2084/17
1 499	ТК 2084/8	13 627	ТК 2084/18
1 549	ТК 2084/9		

10.8. Фильтры на специальные частоты

В прошлом, для измерения систем с менее распространенной емкостью, были разработаны фильтры типа «А» на нестандартные частоты. Эта тенденция была сохранена при появлении фильтров типа «В», причем фильтры на специальные частоты были сконструированы «в духе» рекомендаций 399-1 МККР.

В § 7.3 был описан метод испытания оборудования для преобразования линейного спектра при его загрузке сигналом шума из диапазона верхних частот в диапазон нижних частот и наоборот. Этот случай является примером, иллюстрирующим необходимость измерений на специальных частотах. Фильтры для таких измерений были изготовлены по заказу Британского Почтового ведомства и использовались при испытаниях подводного кабеля CANTAT II между Великобританией и Канадой (см. § 1.6).

10.9. Снижение мощности сигнала шума, вносимое полосно-заграждающими фильтрами

В § 9.7 было рассмотрено влияние АРУ на точность измерения помехозащищенности, а в табл. 9.6.1 и 9.6.2 указаны поправки для двух случаев: при поддержании постоянной общей мощности шума сигнала и при постоянной плотности мощности. В первом случае точность обеспечивалась обычной работой АРУ. Во втором же случае, когда для повышения точности требуется устанавливать постоянную плотность мощности, выходная мощность шума должна быть уменьшена на величину, равную снижению мощности за счет полосы задерживания фильтра. В табл. 10.9.1 указано снижение мощности сигнала шума, вносимое фильтрами типа «В»

Таблица 10.9.1. **Снижение мощности сигнала шума при включении полос-**

Тип комплекта ТК, в состав которого входит полосно-заграждающий фильтр	Средняя частота полосы задерживания ПЗФ, кГц	Снижение уровня мощности сигнала шума, дБ, при включении								
		24, 12—108	60, 12—252	60, 60—300	96, 12—408	120, 60—552	132, 12—552	192, 12—804	252, 12—1052	300, 60—1296
2094/9	16	0,40	0,15	—	0,10	—	0,05	0,05	0,05	—
2094/10	40	0,30	0,10	—	0,05	—	0,05	—	—	—
2094/11	56	0,30	0,10	—	0,05	—	0,05	—	—	—
2094	70	—	0,45	0,40	0,25	0,20	0,20	0,15	0,10	0,10
2094/12	98	0,30	0,15	0,15	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0
2094/14	185	—	0,15	0,15	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
2094/15	240	—	0,15	0,15	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05
2094/1	270	—	—	0,25	0,15	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05
2094/16	394	—	—	—	0,15	0,15	0,15	0,10	—	—
2094/2	534	—	—	—	—	0,25	0,25	0,15	0,10	0,10
2094/19	770	—	—	—	—	—	—	0,20	0,15	0,10
2094/20	1002	—	—	—	—	—	—	—	0,20	0,20
2094/3	1248	—	—	—	—	—	—	—	—	0,20
2094/17	1730	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2094/4	2438	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2094/18	3150	—	—	—	—	—	—	—	—	—

При включении ПЗФ со средней частотой 3886 кГц и более снижение мощности сигнала

Таблица 10.9.2. **Минимальное снижение мощности сигнала шума при**

Тип комплекта ТМ, в состав которого входит полосно-заграждающий фильтр	Средняя частота полосы задерживания ПЗФ, кГц	Снижение уровня мощности сигнала шума, дБ, и спектром						
		12, 12—60	24, 12—108	36, 12—156	48, 12—204	60, 12—252	60, 60—300	120, 60—552
7729	14	0,6	0,3	0,2	0,2	0,1	—	—
7729/21	27	1,0	0,5	0,3	0,3	0,2	—	—
7729/12	34	0,9	0,5	0,3	0,2	0,2	—	—
7729/1	40	1,0	0,5	0,4	0,3	0,2	—	—
7729/13	56	1,0	0,6	0,5	0,3	0,3	—	0,2
7729/2	70	—	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2
7729/3	105	—	0,6	0,7	0,5	0,4	0,4	0,2
7729/4	185	—	—	—	0,6	0,4	0,4	0,2
7729/22	245	—	—	—	—	0,4	0,5	0,3
7729/5	270	—	—	—	—	—	0,5	0,3
7729/6	534	—	—	—	—	—	—	—
7729/15	1 002	—	—	—	—	—	—	—
7729/7	1 248	—	—	—	—	—	—	—
7729/8	2 438	—	—	—	—	—	—	—
7729/9	3 886	—	—	—	—	—	—	—
7729/17	5 340	—	—	—	—	—	—	—
7729/10	8 002	—	—	—	—	—	—	—
7729/11	12 150	—	—	—	—	—	—	—

но-заграждающих фильтров типа «В»

фильтра на входе тракта с указанным ниже числом каналов ТЧ и спектром частот, кГц

432, 12—1796	600, 60—2600	612, 12—2600	792, 12—3284	900, 316—4100	960, 60—4100	972, 12—4100	1200, 316—5600	1260, 60—5600	1800, 316—8160	1872, 12—8160	2700, 316—12 360
0	—	0	0	—	—	0	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
0,05	0,05	0,05	0,05	—	0,05	0,05	—	0	—	0	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
0	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	
0,05	0	0	0	—	0	0	—	0	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0	0	0	0	0
0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0	0	—	—	—
0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0	0
0,15	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0	0
0,20	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	—	—	—
—	0,20	0,20	0,15	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05
—	—	—	0,30	0,20	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05

шума пренебрежимо мало.

включении полосно-заграждающих фильтров типа «А»

при включении фильтра на вход тракта с указанным ниже числом каналов ТЧ частот, кГц

132, 12—552	240, 60—1052	300, 60—1300	600, 60—2660	900, 316—4188	960, 60—4208	1200, 316—5564	1260, 60—5564	1800, 316—8204	2700, 316—12 388
0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,1	0,1	0,1	0	—	0	—	0	—	—
0,2	0,1	0,1	0	—	0	—	0	—	—
0,2	0,1	0,1	0	—	0	—	0	—	—
0,2	0,1	0,1	0	—	0	—	0	—	—
0,2	0,1	0,1	0	—	0	—	0	—	—
0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0
—	0,3	0,3	01,	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0
—	—	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0
—	—	—	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
—	—	—	—	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1
—	—	—	—	—	—	0,3	0,3	0,2	0,1
—	—	—	—	—	—	—	—	0,3	0,2
—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3

при измерениях систем различной емкости. Как и следовало ожидать, на частотах от 3886 кГц и выше фильтры типа «В» незначительно снижают мощность сигнала шума.

В табл. 10.9.2 приведено минимальное снижение мощности сигнала шума, вносимое фильтрами типа «А», при условии, что ширина их полосы по уровню 3 дБ минимальна, т. е. соответствует приведенной в Рекомендации 399 МККР (см. § 8.1). Для реальных фильтров эта полоса может быть существенно шире. Если необходимо для получения максимальной точности измерений при использовании фильтров типа «А» поддерживать постоянную плотность мощности сигнала шума, рекомендуется в каждом конкретном случае измерить ширину полосы частот фильтров по уровню 3 дБ избирательными приборами. При этом снижение уровня мощности сигнала шума (дБ) может быть определено по формуле

$$\text{снижение уровня мощности шума (дБ)} = 10 \lg \frac{\delta f}{f_2 - f_1},$$

где δf — ширина полосы частот фильтра по уровню 3 дБ; $f_2 - f_1$ — ширина полосы частот измеряемого тракта.

Глава 11 Оценка результатов измерений линейных трактов при загрузке их белым шумом

11.1. Рекомендации МККТТ 1976 года

В 1976 г. в Женеве на VI Пленарной Ассамблее МККТТ был принят ряд дополнений к рассмотренным в данной книге рекомендациям. Так, в основные положения по измерениям трактов при загрузке их сигналом белого шума («Оранжевая книга», Рекомендация G.228) включены теперь требования к фильтрам для измерений линейных трактов ВЧ систем передачи емкостью 10 800 каналов ТЧ. В табл. 11.1.1 приведены требования к фильтрам, формирующим полосу частот сигнала белого шума, и средние частоты измерительных каналов для этих трактов, которые даны в табл. 2/G.228 МККТТ и дополняют приведенную автором табл. 8.3.1.

Требования к полосно-заграждающим фильтрам измерительных каналов (табл. 3/G.228 МККТТ) дополнены данными фильтров, необходимых при изме-

Таблица 11.1.1. **Данные фильтров для систем емкостью 10 800 каналов ТЧ**

Число каналов ТЧ в системе	Полоса частот линейного тракта, кГц	Частоты среза фильтров, формирующих полосу частот сигнала шума, кГц		Средняя частота измерительных каналов, кГц
		ФВЧ	ФНЧ	
10 800	4 332—59 684 4 404—59 580	4 370±70	59 600±600	5 340 11 700 26 948 35 748 55 548

Таблица 11.1.2. **Дополнительные требования к полосно-заграждающим фильтрам**

Средняя частота f_0 измерительного канала, кГц	Полоса частот, кГц, относительно f_0, в которой затухание должно быть не менее				Полоса частот, кГц, относительно f_0, вне которой затухание не должно быть более	
	70 дБ	55 дБ	30 дБ	3 дБ	3 дБ	0,5 дБ
70				—		±18
270				—		±24
534				—		±48
1 248				—		±110
2 438				—		±220
3 886				— ±8,0		±350
5 340				±8,5		±150
7 600				±9,5		
11 700				±11,0		
26 948	В стадии изучения					
35 748	±1,8	±2,2	±3,5	±5,0	±20	±150
55 548	±2,5	±3,5	±6,0	±9,5	±30	±200

рениях тракта систем на 10 800 каналов ТЧ, а также некоторыми характеристиками ранее рекомендованных фильтров. Во-первых, введено нормирование полосы частот фильтров, в которой затухание должно быть не менее 3 дБ, во-вторых, приведены требования к полосе частот, в которой неравномерность затухания не должна превышать 0,5 дБ. Указанные дополнения приведены в табл. 11.1.2, которая совместно с табл. 8.3.2 соответствует табл. 3/G228 МККТТ. Фильтры для последних трех измерительных каналов конструируются с использованием высших гармоник кварцевых резонаторов, поэтому у них допускаются увеличения затухания в полосе пропускания до 10 дБ. Эти увеличения затухания могут иметь место в очень узких полосах частот шириной до 1—5 кГц, причем средние частоты этих полос соответствуют частотам гармоник кварцевых резонаторов ниже используемого диапазона частот. Ввиду весьма малой относительной полосы частот этих увеличений затухания по сравнению с полосой частот линейного тракта системы на 10 800 каналов ТЧ, они не будут оказывать влияния на точность измерений.

Большое внимание в Рекомендации G228 уделяется повышению точности измерений. В ней приводятся схемы измерений, типовые кривые помехозащищенности и основные расчетные соотношения. Следует отметить соотношение для пересчета помехозащищенности NPR в уровень мощности помех p_n в полосе канала ТЧ (при этом предлагается учитывать наличие частотных промежутков в многоканальном сигнале между группами):

$$p_n = (-\mathrm{NPR} - 18{,}6 - 10 \lg k + \Delta p),\ \text{дБм0п},$$

где $k = B/4N$ — поправочный коэффициент, учитывающий наличие в частотном спектре промежутков между сигналами групп каналов ТЧ; B — полоса частот линейного тракта ВЧ системы передачи, кГц; N — число каналов ТЧ в измеряемом линейном тракте; Δp — изменение уровня мощности сигнала белого шума, дБ, относительно номинального.

Значения 10 lg k для ВЧ систем передачи с различным числом каналов ТЧ приведены в табл. 11.1.3.

Рекомендации по повышению точности измерений базируются на работах [20, 21], приведенных в Рекомендации G228 МККТТ.

В Рекомендации G222 МККТТ (табл. 1/G222) приведены значения мощности помех, вносимых преобразователями, отличающиеся от данных, изложенных в § 4.4. Для индивидуального преобразования нормируется величина

Таблица 11.1.3. **Численные значения 10 lg k**

N	300	960	2700	10 800
10 lg k, дБ	0,14	0,22	0,46	1,08

Таблица 11.1.4. **Измерительные каналы, рекомендуемые для измерения преобразовательного оборудования**

Группа	Спектр частот, кГц	Средние частоты спектра измерительных каналов, кГц
ПГ	60—108	70 98
ВГ	312—552	331 534
ТГ	812—2044	1002 1248 1730
15ВГ	312—4028	534 1248 3886
ЧГ	8516—12 388	9073 11 700

Таблица 11.1.5. **Данные фильтров для измерения преобразовательного оборудования**

Группа	Число каналов ТЧ	Полоса частот, кГц	Эффективная полоса частот сигнала шума (частоты среза фильтров), кГц		Полосы частот, кГц, подавляемые не менее чем на 75 дБ	
			ФВЧ	ФНЧ	ниже	выше
ПГ (гр. В)	12	60—108	61±2	107±2	6—52	116—1200
ВГ	60	312—552	320±8	546±10	6—288	577—8500
ТГ	300	812—2044	840±16	2004±30	6—412	2318—26 000
15 ВГ	900	312—4028	320±8	4070±60	6—288	4544—30 000
ЧГ	900	8516—12 388	8560±200	12 250±180	6—7686	13 085—135 000
15ВГ (№3)	900	8620—12 336				
					Выше и ниже этих полос ослабление может снижаться со скоростью 6 дБ/октаву	

200 пВт0п, для ПГ — 80 пВт0п, для ВГ — 60 пВт0п, для остальных ступеней преобразования вместо 40—60 пВт0п дается одно значение 60 пВт0п.

Принята новая Рекомендация G230, регламентирующая измерения с нагрузкой белым шумом преобразовательного оборудования. Например, для рассмотренных в § 7.6 измерений каналопреобразующего оборудования приводятся величины мощности сигнала шума для 11 некогерентных источников с пик-фактором 12 дБ: два канала ТЧ, соседние с измерительным, должны быть загружены сигналом шума мощностью по 32 мкВт0 (—15 дБм0), а девять остальных — мощностью 230 мкВт0 (—6,4 дБм0). Таким образом общая мощность сигнала загрузки должна равняться $32 \cdot 2 + 230 \cdot 9 = 2134$ мкВт0 (+3,3 дБм0). Загрузка сигналом шума группового оборудования более высокого порядка должна осуществляться в соответствии с табл. 1/G222 МККТТ:

+3,3 дБм0 — в первичной группе, в спектре которой размещен измерительный канал;

—3,1 дБм0 — в каждой из остальных первичных групп;

+6,1 дБм0 — во вторичной группе, в спектре которой размещен измерительный канал;
+2,3 дБм0 — в каждой из остальных вторичных групп;
+9,8 дБм0 — в каждой из третичных групп;
+14,5 дБм0 — в каждой четверичной группе или группе, сформированной непосредственно из сигналов 15 вторичных групп.

Во всех случаях источники сигналов шума на входах групп должны быть некогерентными.

Рекомендуемые средние частоты измерительных каналов (табл. 1/G230) приведены в табл. 11.1.4, а характеристики фильтров, формирующих полосу сигнала шума для загрузки групп (табл. 2/G230) и полосно-заграждающих фильтров (табл. 3/G230) — соответственно в табл. 11.1.5 и 11.1.6.

Таблица 11.1.6. **Характеристики полосно-заграждающих фильтров для измерения преобразовательного оборудования**

Центральная частота полосы задерживания f_0, кГц	Полоса частот, кГц, относительно f_0, вне которой затухание должно быть не менее			Полоса частот, кГц, относительно f_0, вне которой затухание должно быть не более		Примечание
	70 дБ	55 дБ	30 дБ	3 дБ	0,5 дБ	
70	±1,5	±1,7	±2,0	±5	±10	*a*
98	±1,5	±1,8	±2,1	±4	±9	*b*
331	±1,5	±2,7	±4,0	±15	±30	*a*
534	±1,5	±3,5	±7,0	±17	±48	*c*
1 002	±1,5	±4,0	±9,0	±27	±90	*b*
1 248	±1,5	±4,0	±11,0	±35	±110	*c*
1 730	±1,5	±4,2	±14,0	±48	±155	*b*
3 886	±1,5	±1,8	±3,5	±12	±100	*c*
3 886	—	±15,0	±30,0	±110	±350	
9 073	±1,5	±2,7	±5,8	±18	±250	*a*
11 700	±1,5	±3,0	±7,0	±20	±300	*c*

Обозначения: *a* — предварительные данные; *b* — Рекомендация 482 МККР; *c* — Рекомендация 399-2 МККР.

11.2. Нормирование характеристик линейного тракта, влияющих на помехозащищенность передаваемых сигналов

В настоящее время правильность настройки линейных трактов ВЧ систем передачи и соответствие их характеристик требованиям в процессе эксплуатации определяются рядом параметров. Например, помехозащищенность передаваемых по тракту сигналов характеризуется: уровнем мощности собственных помех в полосе частот, занимаемой сигналами одного канала ТЧ в нескольких точках частотного диапазона линейного тракта; затуханием нелинейности по 2 и 3-й гармоникам, как правило, при одном уровне мощности синусоидального сигнала на одной частоте; уровнем мощности комбинационного продукта (обычно при включении генератора одной из образующих продукт частот на НУП с целью дистанционного определения усилителя с заметно повышенной нелинейностью); амплитудной характеристикой усиления тракта; частотной характеристикой защищенности от переходных помех с параллельных трактов (для ВЧ систем передачи по симметричным кабелям).

Как показали исследования, проведенные в последние годы, выполнение норм по перечисленным характеристикам все же не дает оснований для полной уверенности в том, что при полной загрузке тракта многоканальным сигналом помехозащищенность от суммарных помех будет удовлетворительной. С другой стороны, невыполнение норм по отдельным из указанных характеристик еще не означает, что при полной загрузке тракта не будет выполняться норма по защищенности от суммарных помех.

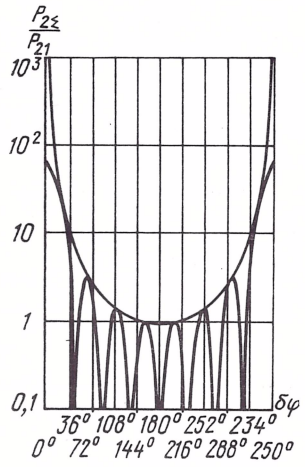


Рис. 11.2.1. Сложение мощностей продуктов нелинейности 2-го порядка

Как показано, например в [22], амплитудная характеристика усиления усилителя неоднозначно определяет уровень его максимальной неискаженной выходной мощности. Это означает, что усилители можно выполнить таким образом, что при одной и той же амплитудной характеристике усиления синусоидального сигнала уровень мощности этого сигнала, при котором становится недопустимым уровень продуктов нелинейности, может быть различным, т. е. либо обеспечивать, либо не обеспечивать требуемую защищенность от суммарных помех.

На основании большого числа экспериментов показано ([22, 23]), что уровень мощности комбинационного продукта нелинейности на одной и той же частоте зависит от частоты образующих его сигналов. Это означает, что выполнение нормы на величину продукта нелинейности при одних частотах образующих сигналов не означает, что при других частотах этих сигналов будет в норме уровень мощности даже этого одного комбинационного продукта.

Большое значение для сложения мощностей продуктов нелинейных искажений, возникающих в последовательно включенных усилителях линейного тракта, имеет сдвиг фазовых характеристик этих усилителей на частоте продукта нелинейных искажений. На рис. 11.2.1 показана приведенная в [24] зависимость отношения суммарной мощности продукта 2-го порядка к мощности продукта 2-го порядка к мощности продукта в одном усилителе от сдвига фаз между напряжениями в соседних усилителях для восьми усилителей (огибающая справедлива для любого числа усилителей). Из этой зависимости следует, что при определенном сдвиге фаз общая мощность продуктов нелинейных искажений может быть даже меньше, чем мощность этого продукта от одного усилителя. Однако стоит лишь изменить частоту продукта нелинейных искажений, как изменится сдвиг фаз и, следовательно, изменится мощность суммарного продукта. Это еще раз убеждает в принципиальной ненадежности оценки помехозащищенности передаваемых по тракту сигналов по результатам измерений затуханий нелинейности тракта на одной частоте или по комбинационным продуктам нелинейных искажений.

Таким образом, только измерение характеристик линейного тракта при его загрузке сигналом белого шума является достаточной гарантией выполнения требований в отношении качества передачи сигналов в смысле их помехозащищенности от суммарных помех.

11.3. Достаточность оценки помехозащищенности сигналов в линейном тракте при его загрузке белым шумом

В случае измерения помехозащищенности сигналов в линейном тракте при загрузке его сигналом белого шума с пик-фактором, соответствующим многоканальному сигналу, нет необходимости отдельно измерять уровни мощности собственных помех, амплитудную характеристику усиления и уровни мощности

продуктов нелинейных искажений. Как показано в [19], а также в § 9.2, форма кривой помехозащищенности в зависимости от уровня мощности сигнала белого шума позволяет однозначно судить о мощностях собственных и нелинейных по-

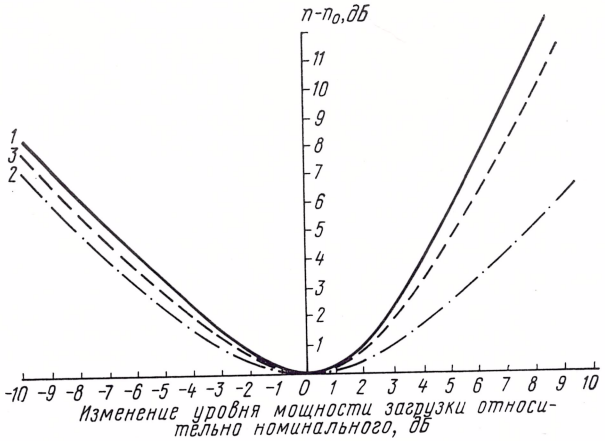


Рис. 11.3.1. Нормированные кривые помехозащищенности

мех в тракте. Например, кривая *1* на рис. 11.3.1 соответствует случаю отсутствия нелинейных помех 2-го порядка; кривая *2* — случаю отсутствия нелинейных помех 3-го порядка, а кривая *3* — следующему распределению мощ-

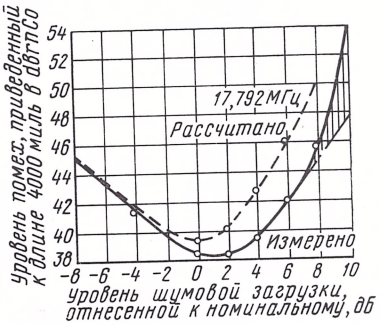


Рис. 11.3.2. Помехозащищенность в верхнем измерительном канале системы L4

ности суммарных помех в оптимальной точке: 60% собственных помех и по 20% нелинейных помех 2 и 3-го порядков. Необходимые для определения составляющих помех соотношения и график приведены в [19].

Отклонение кривых помехозащищенности от расчетных свидетельствует о наличии перегрузки. На рис. 11.3.2 показан результат измерений линейного тракта системы L4. Перегрузка наступает при увеличении уровня мощности загрузки более чем на 8 дБ.

Таким образом, анализ кривой помехозащищенности в одном измерительном канале в диапазоне уровней мощности сигнала белого шума позволяет при необходимости получить информацию об уровнях мощности собственных помех, помех нелинейного происхождения, порядке преобладающих нелинейных искажений и уровне максимальной неискаженной мощности на выходе тракта. Очевидно, что сказанное в полной мере справедливо и для случая измерения с загрузкой белым шумом отдельного усилителя, преобразователя или другого оборудования.

11.4.
Расчет ожидаемых при измерениях значений помехозащищенности и оценка полученных результатов

Как правило, для линейных трактов ВЧ систем передачи нормируется псофометрическая мощность суммарных помех в полосе частот канала ТЧ при номинальном уровне загрузки. На практике наиболее просто измерить помехозащищенность передаваемых сигналов (см. § 6.4). Для определения соответствия измеренных значений нормируемым можно либо каждое измеренное значение помехозащищенности пересчитывать в величину мощности помех в канале ТЧ, либо перед измерениями один раз подсчитать ожидаемые значения помехозащищенности, соответствующие нормируемым величинам мощности помех. Второй способ требует меньших затрат времени и позволяет при измерениях сразу (без пересчета) сопоставить измеренное значение с ожидаемым.

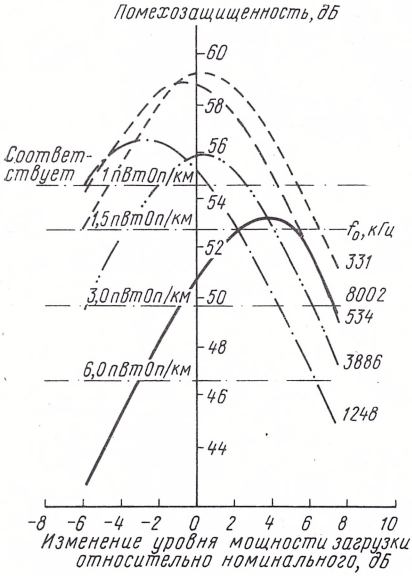


Рис. 11.4.1. Помехозащищенность в случае неоптимального предыскажения

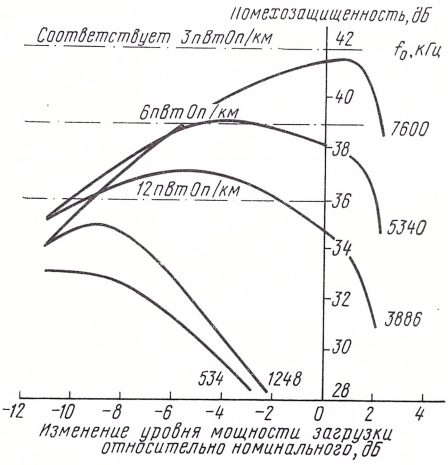


Рис. 11.4.2. Помехозащищенность при повреждении в линейном тракте

Если псофометрическая мощность помех в спектре канала ТЧ в точке с нулевым измерительным уровнем должна составлять $P_{1(0)}$ пВт/км, протяженность измеряемого линейного тракта от места включения передатчика сигнала шума до приемника l км и номинальная мощность загрузки на один канал ТЧ в точке с нулевым измерительным уровнем $P_{к(0)}$ мкВт, то ожидаемое значение помехозащищенности $n_н$ рассчитывается по формуле в децибелах

$$n_н = 10 \lg \frac{P_{k\,(0)}\, k^2}{P_{1\,(0)}\, l \cdot 10^{-6}} = p_{k\,(0)} - p_{1\,(0)} - 10 \lg l - 2{,}5.$$

Например:

$P_{1\,(0)} = 1$ пВт0п/км → — 90 дБм0п;

$P_{k\,(0)} = 50$ мкВт0 → — 13 дБм0;

$l = 100$ км ($10 \lg l = 20$).

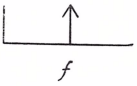
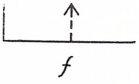
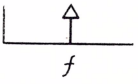
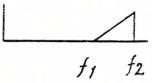
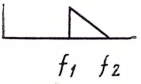
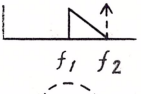
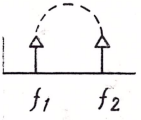
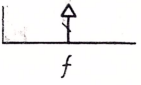
Тогда $n_н = -13 - (-90) - 20 - 2{,}5 = 54{,}5$ дБ, т. е. для рассматриваемого случая $n \geqslant n_н = 54{,}5$ дБ удовлетворяют нормируемому значению мощности помех. Значения $n_н$ целесообразно наносить на графики с результатами измерений. Для облегчения оценки измеренных результатов на графики следует также нанести значения помехозащищенности, соответствующие нескольким значениям мощности помех, кроме $n_н$ (рис. 11.4.1).

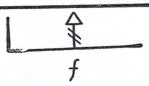
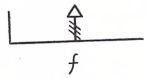
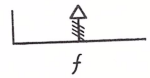
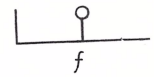
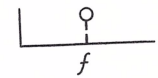
Совокупность измеренных в нескольких измерительных каналах кривых помехозащищенности в сочетании с результатами измерений частотных характеристик затухания тракта позволяет сделать выводы о соответствии тракта ожидаемым значениям, о запасах помехозащищенности, о наличии или отсутствии в тракте повреждений и их характере. Например, приведенные на рис. 11.4.2 результаты измерений свидетельствуют о наличии в тракте источника повышенной нелинейности (частотная характеристика затухания откорректирована). В случае, изображенном на рис. 11.4.1, либо не откорректирована на НУП частотная характеристика затухания данной секции ОУП—ОУП, либо для этой секции ОУП—ОУП предыскажение уровней сигналов на передающем конце не является оптимальным.

Если ВЧ система передачи проектировалась исходя из требования обеспечения одинаковой помехозащищенности сигналов во всех каналах ТЧ, то кривые помехозащищенности при отсутствии повреждений и правильной настройке тракта должны располагаться близко друг к другу, обеспечивая примерно равные запасы в сторону увеличения и уменьшения уровня мощности загрузки относительно номинального до значений, при которых помехозащищенность достигает нормируемых величин.

В случае дифференцированного подхода к нормированию мощности помех в каналах ТЧ, т. е. при проектировании системы таким образом, что мощность помех в различных каналах не одинакова (например, 1 пВт0п/км в части каналов и 3 пВт0п/км в остальных), кривые помехозащищенности должны располагаться в соответствии с таким дифференцированным подходом. Но и в этом случае в каждом измерительном канале при увеличении и уменьшении загрузки системы относительно номинального уровня должны обеспечиваться примерно равные возможно бо́льшие запасы по помехозащищенности до величин загрузки, при которых достигаются нормируемые значения помехозащищенности.

Приложение 1. Условные графические обозначения, рекомендуемые МККТТ

Тип оборудования, частота, спектр частот	Обозначение на схемах
Индивидуальное преобразовательное оборудование (преобразование звукового спектра в спектр первичной группы и наоборот)	
Преобразовательное оборудование первичной группы (преобразование из спектра первичной группы в спектр вторичной группы и наоборот)	
Преобразовательное оборудование вторичной группы (преобразование спектра вторичной группы в спектр третичной группы и наоборот)	
Преобразовательное оборудование третичной группы (преобразование из спектра третичной группы в линейный спектр и наоборот)	
Несущая частота	
Подавленная несущая частота	
Контрольная частота	
Боковая полоса частот, прямой спектр	
Боковая полоса частот, инверсный спектр	
Одна боковая полоса частот с подавленной несущей (передается только нижняя боковая полоса)	
Две контрольные частоты, из которых передается либо одна, либо другая	
Контрольная частота первичной группы	

Тип оборудования, частота, спектр частот	Обозначение на схемах
Контрольная частота вторичной группы	
Контрольная частота третичной группы	
Контрольная частота четверичной группы	
Дополнительная измерительная частота, общее обозначение	
Дополнительная измерительная частота, которая передается или измеряется по требованию	
Первичная группа с прямым расположением спектров частот каналов ТЧ (частота в спектре первичной группы возрастает с ростом звуковой частоты в соответствующем канале ТЧ)	
Первичная группа с инверсным расположением спектров частот каналов ТЧ (частота в спектре первичной группы возрастает с уменьшением звуковой частоты в соответствующем канале ТЧ)	
Вторичная группа с прямым расположением спектров частот каналов ТЧ (частота в спектре вторичной группы возрастает с увеличением звуковой частоты в соответствующем канале ТЧ)	
Вторичная группа с инверсным расположением спектров частот каналов ТЧ (частота в спектре вторичной группы возрастает с уменьшением звуковой частоты в соответствующем канале ТЧ)	
Третичная группа с прямым расположением спектров частот каналов ТЧ (частота в спектре третичной группы возрастает с увеличением звуковой частоты в соответствующем канале ТЧ)	
Третичная группа с инверсным расположением спектров частот каналов ТЧ (частота в спектре третичной группы возрастает с уменьшением звуковой частоты в соответствующем канале ТЧ)	
Четверичная группа с прямым расположением спектров частот каналов ТЧ (частота в спектре четверичной группы возрастает с увеличением звуковой частоты в соответствующем канале ТЧ)	
Четверичная группа с инверсным расположением спектров частот каналов ТЧ (частота в спектре четверичной группы возрастает с уменьшением звуковой частоты в соответствующем канале ТЧ)	

Приложение 2. Зависимость числа активных каналов ТЧ от номинальной емкости системы

Условные обозначения: N — номинальная емкость системы (общее число каналов ТЧ); n — число активных каналов; a — коэффициент активности одного канала.

Вероятность $p(n')$ одновременной активности некоторого определенного числа n каналов представляет собой не что иное, как вероятность двух одновременных событий — n активных каналов и $N-n$ неактивных каналов, т. е.

$$p(n') = a^n (1-a)^{N-n}.$$

Заметим, что число n из общего количества N можно выбрать $N/n!(N-n)!$ способами. Поэтому вероятность одновременной активности любых n каналов $p(n)$ составляет

$$p(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} a^n (1-a)^{N-n}.$$

Особый интерес представляет случай, когда n или менее каналов являются активными в течение 99% времени. Иными словами, когда число активных каналов n превышается только в течение 1% времени. Вероятность $P(n)$ активности любого количества каналов от 0 до n составляет

$$P(n) = \sum_{0}^{n} \frac{N!}{n!(N-n)!} a^n (1-a)^{N-n}.$$

На рис. 5.3.1 изображена зависимость n от N при $P(n) = 0{,}99$.

Приложение 3. Вывод формулы пересчета величины помехозащищенности в отношение сигнал/помеха

Условные обозначения: $p_{м(0)}$ — уровень мощности номинальной загрузки, дБм0; Δf — ширина полосы испытуемого тракта, кГц.

Уровень мощности шума сигнала в спектре канала ТЧ шириной 3,1 кГц при номинальной загрузке может быть представлен в виде

$$p_{к\,(0)} = p_{м\,(0)} - 10 \lg \frac{\Delta f}{3{,}1}, \text{ дБм0/канал.}$$

Уровень мощности помех в спектре канала ТЧ при этом составит

уровень мощности помех в канале $= p_{м\,(0)} - 10 \lg \frac{\Delta f}{3{,}1} -$

— помехозащищенность, дБм0/канал.

Однако уровень мощности помех в канале, выраженный в дБм0, равен отношению сигнал/помеха, взятому с обратным знаком. Следовательно,

невзвешенное отношение сигнал/помеха =

$$= \text{помехозащищенность} + 10 \lg \frac{\Delta f}{3{,}1} - p_{м\,(0)}. \quad (1)$$

Для аппроксимации ур-ния (1) могут быть использованы следующие выражения:

для $N \geqslant 240$ $p_{м\,(0)} = -15 + 10 \lg N$ (2)

и $10 \lg \frac{\Delta f}{3{,}1} \approx 10 \lg N + 1{,}3$ (с погрешностью не более ± 0,2 дБ). (3)

С учетом (2) и (3) из (1), получим:

невзвешенное отношение сигнал/помеха = помехозащищенность + 16,3; (4)

для $N<240$ $p_{м\,(0)} = -1+4\lg N$ (5)

и $10\lg\dfrac{\Delta f}{3,1} = 10\lg N + 1,1.$ (6)

С учетом (5) и (6) из (1) получим

невзвешенное отношение сигнал/помеха = помехозащищенность + 6 lg N + + 2,1. (7)

Для получения взвешенных значений отношения сигнал/помеха к равенствам (4) и (7) следует прибавить взвешивающий коэффициент W, дБ. При этом получаем:

взвешенное отношение сигнал/помеха = помехозащищенность + 16,3 + W для $N\geqslant 240$; (8)

взвешенное отношение сигнал/помеха = помехозащищенность + 6 lg N + + 2,1 + W для $N<240$.

Формулы (9), (10) и (11) § 6.9 получены из выражения (9), приведенного выше, а ф-лы (13), (14) и (15) — из выражения (8) при подстановке следующих взвешивающих коэффициентов:

псофометрический коэффициент $W=2,5$ дБ;

взвешивающий коэффициент для приборов типа С $W=1,5$ дБ;

взвешивающий коэффициент для приборов типа F1A $W=3,0$ дБ.

Приложение 4. Формула расчета поправок при измерениях больших значений помехозащищенности (NPR)

Условные обозначения:

NPR_s — истинное значение помехозащищенности испытуемого объекта;

NPR_I — собственная помехозащищенность установки для измерения трактов при загрузке белым шумом;

NPR_{I+s} — измеренное значение помехозащищенности испытуемого объекта;

k — поправочный коэффициент;

P — мощность загрузки сигналом шума в спектре измерительного канала;

N_I — мощность суммарных помех, вносимых в спектр измерительного канала установкой для измерения трактов при загрузке белым шумом;

N_s — мощность суммарных помех испытуемого объекта в спектре измерительного канала.

Используя определение помехозащищенности, получаем:

$$\mathrm{NPR}_s = 10\lg\frac{P}{N_s}; \quad (1) \quad \mathrm{NPR}_I = 10\lg\frac{P}{N_I}; \tag{2}$$

$$\mathrm{NPR}_{I+s} = 10\lg\frac{P}{N_I + N_s}. \tag{3}$$

Поправочный коэффициент k определяется следующим образом:

$$\mathrm{NPR}_s = \mathrm{NPR}_{I+s} + 10\lg k, \tag{4}$$

откуда

$$k = \frac{P}{N_s}\cdot\frac{N_I + N_s}{P} = 1 + \frac{N_I}{N_s}. \tag{5}$$

Разность между собственной и измеренной помехозащищенностью составляет

$$\mathrm{NPR}_I - \mathrm{NPR}_{I+s} = 10 \lg \frac{N_I + N_s}{N_I} = 10 \lg \left(1 + \frac{N_s}{N_I}\right). \quad (6)$$

После преобразования выражения (5) получаем

$$1 + \frac{N_s}{N_1} = \frac{k}{k-1}. \quad (7)$$

Объединяя равенства (6) и (7), имеем

$$\mathrm{NPR}_I - \mathrm{NPR}_{I+s} = 10 \lg \frac{k}{k-1}. \quad (8)$$

На рис. 7.7.1 изображена зависимость величины $10 \lg k$ от разности $NPR_I — NPR_{I+s}$.

Приложение 5. Вывод расчетных формул нормализованных кривых помехозащищенности и отношения сигнал/помеха

Условные обозначения:

P — мощность сигнала белого шума в полосе частот измерительного канала (щели) при загрузке тракта;

$P_т$ — мощность собственных помех в полосе частот измерительной щели;

γ — порядок преобладающих нелинейных искажений;

r — отношение мощностей шума в канале при выключенном и включенном полосно-заграждающем фильтре.

Тогда помехозащищенность $n = 10 \lg r$, где

$$r = \frac{P}{aP_т + bP^\gamma}; \quad (1)$$

a и b — постоянные, характеризующие линейность системы. Значение r максимально ($r = r_0$), когда $dr/dP = 0$ или $aP_т + bP\gamma = b\gamma P\gamma$, откуда

$$a P_т = (\gamma - 1)\, b\, P_0^\gamma, \quad (2)$$

где $P = P_0$ при $r = r_0$.

Таким образом, максимальное значение помехозащищенности имеет место при r_0, которое равно (из (1) и (2))

$$r_0 = \frac{P_0}{\gamma\, b\, P_0^\gamma}, \quad (3)$$

а

$$r = \frac{P/b}{(\gamma - 1)\, P_0^\gamma + P^\gamma}. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) получаем отношение r к r_0:

$$\frac{r}{r_0} = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{\gamma}{(\gamma - 1) + (P/P_0)^\gamma}. \quad (5)$$

Но $10 \lg (r/r_0)$ — это выраженная в децибелах разница между помехозащищенностью n при уровне мощности загрузки, соответствующем мощности в канале P, и максимальной помехозащищенностью n_0 при уровне мощности загрузки, соответствующем мощности в канале P_0. Следовательно,

$$n - n_0 = 10 \lg \frac{P}{P_0} - 10 \lg \left[\left(\frac{P}{P_0}\right)^\gamma + (\gamma - 1)\right] + 10 \lg \gamma. \quad (6)$$

Таким образом, это выражение связывает разность между текущим и максимальным значением помехозащищенности и разность между текущим уровнем мощности загрузки и уровнем мощности загрузки, соответствующим максимальной помехозащищенности.

На рис. 9.2.1 изображены кривые, соответствующие выражению (6) при различных значениях γ (преобладающего порядка продуктов нелинейных искажений).

Отношение сигнал/помеха s связано с помехозащищенностью n следующим образом:

$$s_0 - s = 10 \lg \frac{P}{P_0} - 10 \lg \frac{r}{r_0}. \tag{7}$$

Из выражений (6) и (7), получим

$$s_0 - s = 10 \lg [(P/P_0)^\gamma + (\gamma - 1)] - 10 \lg \gamma. \tag{8}$$

На рис. 9.2.2 изображены кривые, соответствующие выражению (8) при различных значениях γ.

Приложение 6. Формулы расчета поправок к измеренному значению помехозащищенности для учета влияния ширины щели на результаты измерений

Анализ основан на теореме Винера-Хинчина, которая гласит, что автокорреляционная функция $R(\tau)$ и спектральная плотность мощности $G(f)$ случайной временной функции связаны между собой преобразованием Фурье. Следовательно, спектральная плотность мощности, соответствующая произведению двух автокорреляционных функций $R_x(\tau)$ и $R_y(\tau)$, которым соответствуют спектральные плотности мощности $G_x(f)$ и $G_y(f)$, может быть представлена в виде свертки

$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) R_y(\tau) e^{-i 2\pi f \tau} d\tau.$$

Если $x(t)$ представляет собой случайный гауссов процесс (шум) с автокорреляционной функцией $R(\tau)$ и средней мощностью R_0, то автокорреляционные функции $R_2(\tau)$, $R_3(\tau)$ и процессов $x^2(t)$, $x^3(t)$ и $x^4(t)$ могут быть выражены следующим образом (см., например, Baum IEEE Transactions, IT-15, N 4, p. 448):

$$R_2(\tau) = 2R^2(\tau) + R_0^2;$$

$$R_3(\tau) = 6R^3(\tau) + 9R_0^2 R(\tau);$$

$$R_4(\tau) = 24R^4(\tau) + 72R_0^2 R^2(\tau) + 9R_0^4,$$

где $R_0 = R(0)$.

Однако мощности помех соответствуют только те слагаемые, в которые входят $R(\tau)$ во второй и более степенях; более того, не считая результатов, полученных для искажений высоких порядков, следует учитывать только отношение мощностей. По этой причине числовые коэффициенты при R_2, R_3 и R_4 не существенны, и эти выражения могут быть упрощены следующим образом:

$$R_2(\tau) = R^2(\tau);$$

$$R_3(\tau) = R(\tau) R_2(\tau);$$

$$R_4(\tau) = R(\tau) R_3(\tau) + 3R_0^2 R_2(\tau).$$

Спектральные плотности мощности искажений для процессов x^2, x^3 и x^4 при этом могут быть получены при помощи свертки, причем общее выражение для спектра $G_n(f)$ процесса x^n имеет вид

$$G_n(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{n-1}(\tau) R(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau.$$

Поправка к значению помехозащищенности получена путем определения общей мощности искажений в измерительном канале при $G_n(f)$, соответствующей загрузке полного тракта, и сравнения этой мощности с мощностью искажений в измерительном канале, когда $G_n(f)$ соответствует загрузке всей полосы тракта, за исключением измерительного канала. Отношение этих двух мощностей представляет собой погрешность измерения помехозащищенности и обозначено P_s/P_0 в приведенных ниже выражениях, которые выведены для варианта постоянной плотности мощности.

Работа системы без предыскажения уровней

Нижний измерительный канал

2-й порядок ($a \leqslant b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)_{B2F} = \frac{(1-b) - \frac{3}{2}a}{(1-b) - \frac{1}{2}a};$$

3-й порядок ($a \leqslant b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)_{B3F} = \frac{(1-2b+2b^2) - a(4-5b) + \frac{13}{3}a^2}{(1-2b+2b^2) + ab - \frac{1}{6}a^2};$$

4-й порядок ($a \leqslant b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)_{B4F} = \frac{D - N + 72\,P_{s\,B2F}}{D + 72\,P_{0\,B2F}},$$

где $N = 72a[(4-8b+9b^2) - a(8-13b) + 7a^2]$; $D = 4(16-24b+42b^2-47b^3) - 6ab(4+7b) - 4a^2(2-b) + 9a^3$.

Верхний измерительный канал

2-й порядок ($a \leqslant b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)_{T2F} = 1;$$

2-й порядок ($a \geqslant b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)'_{T2F} = \frac{-b^2 + a(1+b) - \frac{3}{2}a^2}{b^2 + a(1-3b) + \frac{1}{2}a^2};$$

3-й порядок ($a \leqslant 2b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)_{T3F} = \frac{(1-b+b^2) - \frac{1}{2}a(5-b) + \frac{11}{6}a^2}{(1-b+b^2) + \frac{1}{2}a(1+b) - \frac{5}{12}a^2};$$

3-й порядок ($a \geqslant 2b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)'_{\text{T3F}} = \frac{4b^2(1+2b)+2a(1-2b-5b^2)-a^2(5-6b)+\frac{19}{6}a^3}{-4b^3+2a(1-b+4b^2)+a^2(1-2b)-\frac{1}{3}a^3};$$

4-й порядок ($a \leqslant b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)_{\text{T4F}} = \frac{D-N+144[2(1-b)-a]}{D+144[2(1-b)-a]},$$

где $N=4a[21(3-4b+b^2)-21a(3-2b)+31a^2]$; $D=4(16-9b-6b^2+127b^3)+2a(15-66b+27b^2)-4a^2(1-3b)+17a^3$;

4-й порядок ($b \leqslant a \leqslant 3b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)'_{\text{T4F}} = \frac{N+288\,P_{s\,\text{T}\,2\text{F}}}{D+288\,P'_{0\,\text{T}2\text{F}}},$$

где $N=-4b(7-30b+33b^2-136b^3)+4a(23-18b-39b^2)-6a^2(51-64b-25b^2)+4a^3(83-92b)-111a^4$; $D=-4b(7-30b+33b^2-124b^3)+4a(23-39b+21b^2+15b^3)+6a^2(5-18b-11b^2)-4a^3(1-27b)$;

4-й порядок ($3b \leqslant a \leqslant (1-b)/2$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)''_{\text{T4E}} = \frac{N+288\,P'_{s\,\text{T}2\text{F}}}{D+288\,P'_{0\,\text{T}2\text{F}}};$$

где $N=-2b(14+1056b-5028b^2+8251b^3)+4a(23+168b-312b^2+552b^3)-6a^2(51+64b-64b^2)+4a^3(83-12b)-115a^4$; $D=-4b(7+78b-75b^2-97b^3)+4a(23-3b+93b^2-57b^3)+6a^2(5-42b+b^2)-4a^3(1-27b)-3a^4$.

Работа системы с предыскажением уровней

Нижний измерительный канал

2-й порядок ($a \leqslant b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)_{\text{B2P}} = \frac{e^{2k}-e^{2k(b+1,5a)}}{e^{2k}-e^{2k(b+0,5a)}};$$

3-й порядок ($a \leqslant b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)_{\text{B3P}} = \frac{N_0+N_1}{D_0+D_1e^{ka}+D_2e^{-ka}},$$

где $N_0=(2k-4kb-3)e^{-2kb}-(2k-3)$; $N_1=4ka(1-e^{-2kb})+(2k-3-2ka)e^{ka}-(2k-4kb-3-6ka)e^{-2kb-ka}+(1-e^{-ka})(1+e^{2kb+ka})e^{-2k+4ka}$; $D_0=(2k-3-4kb)e^{-2kb}-(2k+5)-3e^{-2k}-e^{2kb-2k}$; $D_1=e^{2kb-2k}+2k+(3-2ka)(1+e^{-2k})$; $D_2=2-(2k-3-4kb-2ka)e^{-2kb}$.

Верхний измерительный канал

2-й порядок ($a \leqslant b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)_{\text{T2P}} = 1;$$

2-й порядок ($a \geqslant b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)'_{\text{Т2Р}} = \frac{(1+k+kb-2ka)\,e^{ka}+(1-k+kb+ka)-2e^{kb}}{(k-1-kb)\,e^{ka}+(1-k+kb+ka)+(e^{kb}-e^{ka})^2};$$

3-й порядок ($a \leqslant 2b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)_{\text{Т3Р}} = \frac{N_0+N_1}{D_0+D_1\,e^{ka}+D_2\,e^{-ka}},$$

где $N_0 = c^2+1-3(1{,}5+k)e^{2kb}$; $N_1 = 1{,}5\,e^{2k+2kb}(e^{-3ka}-e^{-4ka})+6ka\,e^{2kb}+3(1{,}5+k-ka)e^{2kb-ka}-(c^2+1-2kac+k^2a^2)e^{-ka}$; $D_0 = c^2+1+3(2{,}5-k)e^{2kb}+4{,}5e^{2k+2kb}$; $D_1 = -3e^{-2kb}$; $D_2 = -3(1{,}5-k+ka)e^{2kb}-3(1{,}5+ka)e^{2k+2kb}-(c^2+1-2kac+k^2a^2)$; $c = k(1-2b)-1$;

3-й порядок ($a \geqslant 2b$):

$$\left(\frac{P_s}{P_0}\right)'_{\text{Т3Р}} = \frac{(N_0+N_0')+(N_1+N_1')}{(D_0+D_0')+(D_1+D_1')\,e^{ka}+(D_2+D_2')\,e^{-ka}},$$

где $N'_0 = -3[(1+2kb)^2+1]$; $N'_1 = 6ka(1+2kb)-3k^2a^2+6\,e^{2kb-ka}$; $D'_0 = 6\,e^{2kb}$; $D'_1 = -3(1{,}5+2kb-ka)$; $D'_2 = -1{,}5\,e^{4kb}$; N_0, N_1, D_0, D_1 и D_2 те же, что в $\left(\frac{P_s}{P_0}\right)_{\text{Т3Р}}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **The World's Telephones,** December 1972. American Telephone and Telegraph Company, New York 10013.
2. **Selected** Articles from GTE Lenkurt Demodulator. Published by GTE Lenkurt, San Carlos, California 94070.
3. **CCITT** IV Plenary Assembly, Mar Del Plata, 1968. White Book Volume III — Line Transmission. Published by International Telecommunications Union, Geneva.
4. **CCIR** Documents of the XIIth Plenary Assembly, New Delhi, 1970, Volume IV, Part 1. Fixed Service using Radio Relay Systems. Published by International Telecommunications Union, Geneva.
5. **Evaluation** of Message Circuit Noise. A. J. Aikens and D. A. Lewinski. — Bell System Technical Journal, July, 1960.
6. **US** Department of Defense, MIL-STD-188C, November, 1969. Military Communication System Technical Standards.
7. **Defense** Communications Agency Circular (DCAC) 330-175-1 (formerly DCAC 175-2A, April, 1963). Defense Communication System Engineering Installation Standards Manual. Published by DCA, Washington, DC, 20305.
8. **Load** Rating Theory for Multichannel Amplifiers. B. D. Holbrook and J. T. Dixon. — Bell System Technical Journal, October, 1939.
9. **Equipment** for Measurement of Interchannel Crosstalk and Noise on Broadband Multichannel Telephone Systems. R. W. White and J. S. Whyte. — The Post Office Electrical Engineers' Journal, October, 1955.
10. **IRIG** Document 118-71 — Test Methods for Telemetry Systems and Subsystems — Range Commanders Council, Telemetry Working Group, Inter Range Instrumentation Group. Published by Range Commanders Council — White Sands Missile Range, New Mexico, 88002, March, 1971.
11. **CCIR** Documents of the Xth Plenary Assembly, Geneva 1963, Volume IV — Radio Relay Systems. Space Systems and Radio Astronomy. Published by International Telecommunications Union, Geneva.
12. **CCITT** III Plenary Assembly, Geneva, 1964. Blue Book Volume III — Line Transmission. Published by International Telecommunications Union, Geneva.
13. **INTELSAT** — Satellite System Operations Guide — Volume II, June, 1971, Appendix B. 2 — White Noise Loading Testing Equipment. Communications Satellite Corporation, Washington, DC, 20024.

СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

14. **Резников М. Р.** 50 лет советской связи. М.: Связь, 1967.
15. **80 лет** радио. Под ред. А. Д. Фортушенко. М.: Связь, 1975.
16. **Ромбро В. С., Фарбер Ю. Д.** Измерения характеристик многоканальных систем связи. М.: Связь, 1977.
17. **Пухальский А. Ч.** Измерения в дальней связи. М.: Связьиздат, 1952.
18. **Соловьев Н. Н.** Измерительная техника в проводной связи. Часть I. Общие вопросы измерений. М.: Связь, 1968.
19. **Ромбро В. С.** Измерения линейных трактов ВЧ систем передачи при их загрузке сигналом «белого» шума. — В кн.: Обмен опытом строительства сооружений связи. М., 1971, вып. 1.
20. **Mueller M.** Noise loading test errors due to finite slot width. Data and Communications design, March — April, 1973, p. 20—24.
21. **Spindler W.** Noise loading measuring procedures and error sources. Telecommunications, July, 1974, p. 32C—32F.
22. **Куликова В. И.** Исследование нелинейных искажений транзисторов и усилителей линейных трактов ВЧ систем передачи: Дис. на степень канд. техн. наук. М., 1978. В надзаг.: М-во связи СССР, ЦНИИС.
23. **Камионская Г. И., Трофимова Г. С.** Экспериментальная проверка метода расчета шумов линейных усилителей коаксиальных систем связи. — В кн.: Научные труды ЦНИИС. М., 1975, № 1, с.
24. **Передача** сообщений. Т. I. Основы высокочастотной передачи по проводным линиям связи: /Под ред. Э. Гельцера, Д. Тирбаха:/ пер. с нем. под ред. Ю. Д. Фарбера. М : Связь, 1971.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие к русскому изданию 5
Введение 6

Глава 1. Многоканальные телефонные системы с частотным уплотнением

1.1. Краткая история многоканальной передачи телефонных сигналов 7
1.2. Системы малой емкости 8
1.3. Коаксиальные кабельные системы 9
1.4. Радиорелейные системы на УКВ (прямой видимости) . 11
1.5. Системы тропосферного рассеивания (загоризонтные) . 14
1.6. Системы подводного кабеля (подводные усилители) . . 16
1.7. Спутниковые системы 18

Глава 2. Терминология частотного уплотнения и модуляционные планы

2.1. Телефонный канал 22
2.2. Каналопреобразующее оборудование и первичные группы 23
2.3. Преобразовательное оборудование первичной группы и вторичные группы 24
2.4. Третичная группа 25
2.5. Четверичные группы и объединение вторичных групп . . 26
2.6. Объединение сигналов каналов ТЧ и видеосигналов . . 29
2.7. Системы большой емкости 30
2.8. Контрольные частоты 30

Глава 3. Единицы измерения помех в телефонных системах. Взвешивание 31

3.1. Единицы измерения мощности «пВт» и уровней мощности «дБм» 31
3.2. Псофометрическое взвешивание в телефонных цепях . 32
3.3. Псофометрические единицы мощности и уровни псофометрической мощности 33
3.4. Единицы плотности мощности 33
3.5. Уровни в системах передачи и точка нулевого измерительного уровня 33
3.6. Измерительный уровень передачи 34
3.7. Относительный уровень мощности 34
3.8. Взвешивание контуром типа 144 — единица измерения уровней мощности помех dBrn (144-line) 36
3.9. Взвешивание контуром типа F1A — единица измерений уровней мощности помех dBa (F1A) 37
3.10. Взвешивание контуром типа С — единица измерения уровней мощности помех dBrnC 38
3.11. Соотношения между американскими и европейскими единицами измерения уровней мощности помех 38
3.12. Гармонические сигналы и нестандартные полосы частот 41

Глава 4. Требования к мощности помех в многоканальных системах . 41

4.1. Рекомендации и стандарты 42
4.2. Эталонные гипотетические цепи (ЭГЦ) 45
4.3. Допустимые помехи в цепях реальных линий 51
4.4. Требования к помехам преобразовательного оборудования 51

Глава 5. Загрузка многоканальным сигналом 51

5.1. Источники помех в телефонной системе 51
5.2. Одноканальный и многоканальный пик-фактор . . . 52
5.3. Коэффициенты активности многоканальных систем . . 53

Стр.

5.4. Уровень средней мощности многоканального сигнала в системах большой емкости 56
5.5. Уровень средней мощности многоканального сигнала в системах малой емкости 56
5.6. Уровень средней мощности многоканального сигнала при цифровой загрузке 57

Глава 6. Метод загрузки сигналом шума и измерительные приборы .

6.1. Имитация многоканального сигнала белым шумом . . 58
6.2. Полоса частот белого шума 60
6.3. Измерение нелинейных и собственных помех 60
6.4. Помехозащищенность 61
6.5. Описание типичной установки для измерений при загрузке трактов белым шумом 62
6.6. Измерение собственных помех и защищенность тракта от собственных помех 63
6.7. Отношение сигнал/помеха 64
6.8. Другие абсолютные единицы 64
6.9. Зависимость между помехозащищенностью и отношением сигнал/помеха 65

Глава 7. Измерение трактов и оборудования при их загрузке белым шумом 67

7.1. Типичная кривая помехозащищенности 67
7.2. Измерения линейных трактов 68
7.3. Преобразовательное оборудование линейного тракта (оборудование сопряжения) 69
7.4. Преобразовательное оборудование групповых трактов . 70
7.5. Измерение «тракт — канал ТЧ» 70
7.6. Каналопреобразующее оборудование и системы малой емкости 71
7.7. Узлы систем с высокой помехозащищенностью . . . 72
7.8. Измерение помех при реальной загрузке 73
7.9. Характеристики помех широкополосных магнитофонов . 74

Глава 8. Обзор рекомендаций по испытаниям с загрузкой белым шумом

8.1. Ранние рекомендации МККР и МККТТ (оборудование типа «А») 74
8.2. Стандарты DCA и MIL-STD 77
8.3. Последние рекомендации МККР и МККТТ (оборудование типа «В») 77
8.4. Рекомендации INTELSAT 80
8.5. Сравнение приборов типов «А» и «В» 81
8.6. Совместимость аппаратуры 85
8.7. Рекомендации по измерениям помех при реальной загрузке 87

Глава 9. Факторы, влияющие на точность измерения помехозащищенности 88

9.1. Вводные замечания о точности измерения помехозащищенности 88
9.2. Нормализованные кривые помехозащищенности и отношения сигнал/помеха 89
9.3. Три зоны кривой помехозащищенности 90
9.4. Параметры передатчика сигнала шума 91
9.5. Параметры приемника сигнала шума 92
9.6. Влияние ширины щели на точность измерения помехозащищенности 93
9.7. Влияние АРУ 96
9.8. Влияние предыскажения 98

Стр.

9.9. Поправки к значению помехозащищенности, компенсирующие погрешность из-за влияния ширины щели на результаты измерений 99
9.10. Нелинейные искажения более высоких порядков . . . 99
9.11. Точность измерения помехозащищенности с учетом влияния всех рассмотренных факторов 100

Глава 10. Установки для измерения при загрузке белым шумом и фильтры фирмы «Marconi Instruments» 102

10.1. Модели 0А 1249 и 0А 2090 102
10.2. Установка типа 0А 2090А для измерения трактов при загрузке белым шумом 103
10.3. Установка типа 0А 2090В для измерений трактов при загрузке белым шумом 103
10.4. Автоматизированный приемник сигнала шума типа TF 2092C 107
10.5. Дополнительный блок ТК 2099АВ 107
10.6. Двенадцатиканальный генератор сигнала шума типа TM 7816A 109
10.7. Фильтры на стандартные частоты 109
10.8. Фильтры на специальные частоты 111
10.9. Снижение мощности сигнала шума, вносимое полосно-заграждающими фильтрами 111

Глава 11. Оценка результатов измерений линейных трактов при загрузке их белым шумом 114

11.1. Рекомендации МККТТ 1976 года 114
11.2. Нормирование характеристик линейного тракта, влияющих на помехозащищенность передаваемых сигналов . 117
11.3. Достаточность оценки помехозащищенности сигналов в линейном тракте при его загрузке белым шумом . . 118
11.4. Расчет ожидаемых при измерениях значений помехозащищенности и оценка полученных результатов 120

Приложение 1. Условные графические обозначения, рекомендуемые МККТТ 122
Приложение 2. Зависимость числа активных каналов ТЧ от номинальной емкости системы 124
Приложение 3. Вывод формулы пересчета величины помехозащищенности в отношение сигнал/помеха 124
Приложение 4. Формула расчета поправок при измерениях больших значений помехозащищенности (NPR) 125
Приложение 5. Вывод расчетных формул нормализованных кривых помехозащищенности и отношения сигнал/помеха . 126
Приложение 6. Формулы расчета поправок к измеренному значению помехозащищенности для учета влияния ширины щели на результаты измерений 127
Список литературы 131
Список дополнительной литературы 132

ИБ № 166

Микаэл Д. Тант

**Многоканальные системы.
Испытания белым шумом**

Ответственный редактор В. С. Ромбро
Редактор Н. М. Улановская
Обл. художника М. Буткина
Художественный редактор Р. А. Казаков
Технические редакторы К. Г. Маркоч, Л. А. Горшкова
Корректор Г. Ф. Кцоева

Сдано в набор 20/III 1978 г. Подп. в печ. 7/VII 1978 г.
Формат 60×90/16 Бумага тип. № 1. Гарн. литерат. Печать высокая.
8,5 усл.-печ. л. 9,21 уч.-изд. л. Тираж 7 000 экз. Изд. № 18141. Зак. № 97
Цена 65 коп.
Издательство «Связь». Москва 101000, Чистопрудный бульвар, д. 2

Типография издательства «Связь» Госкомиздата СССР
101000 Москва, ул. Кирова, д. 40

65 коп.